

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Vliv zaoblení ostří nástroje na dynamické zatížení soustavy při
obrábění

Influence of Cutting Edge Radius on Dynamic Load of System
During the Machining

Student:

Bc. Radek Vydra

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radek Vydra**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv zaoblení ostří nástroje na dynamické zatížení soustavy při obrábění**
Influence of Cutting Edge Radius on Dynamic Load of System During the Machining
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Analýza současného stavu.
3. Návrh experimentálních měření.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.
5. Závěr a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] HAVRILA, Michal; ZAJAC, Jozef; BRYCHTA, Josef; JURKO, Jozef; *Top trendy v obrábění, I. část – Obráběné materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 205 s. ISBN 80-968954-2-7.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016




doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě16.5.2016.....

..........
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....16.5.2016.....

.....
.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Radek Vydra

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Jalubí 624, 68705

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VYDRA, R. *Vliv zaoblení ostří nástroje na dynamické zatížení soustavy při obrábění: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 62 s. Vedoucí práce Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

V diplomové práci byl řešen vliv zaoblení ostří nástroje na dynamické zatížení soustavy. Tento experiment byl uskutečněn při podélném soustružení hliníkové slitiny na CNC soustružnickém centru. Dynamické zatížení bylo měřeno pomocí tříosého dynamometru a dalších jeho příslušenství. Cílem diplomové práce bylo nalezení možné závislosti mezi velikostí zaoblení ostří nástroje, postupného otupení a změnou řezných parametrů na jednotlivé složky a výslednou sílu řezání, které řezný proces provází. Seznámení s měřením těchto sil. S problematikou obrábění hliníku a hliníkových slitin, jejich řezných parametrů a volbou vhodné geometrie.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

VYDRA, R. *Influence of Cutting Edge Radius on Dynamic Load of System During the Machining: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2016, 62p. Thesis head: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

The thesis was solved influence of cutting edge radius on the dynamic system load. This experiment was carried out in longitudinal turning of aluminum alloy on a CNC lathe. Dynamic load was measured using a triaxial dynamometer and other accessories. The aim of the thesis was to find a possible relation between the curvature of the cutting edge, progressive blunting and changing the cutting parameters for each component and the resulting cutting force that accompanies the cutting process. Familiarization with the measurement of these forces, the problems of machining of aluminum and aluminum alloys, the cutting parameters and selecting the appropriate geometry.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	8
Úvod	10
1. Současný stav obrábění hliníku a jeho slitin	11
1.1 Strukturní a fyzikální vlastnosti hliníku a jeho slitin	11
1.2 Proces a produktivita obrábění hliníku	12
1.2.1 Obrobitelnost hliníku a jeho slitin	12
1.2.2 Proces obrábění	13
1.2.3 Řezné nástroje	14
1.2.4 Řezné podmínky	15
1.3 Dynamické zatížení soustavy a měření složek síly řezání	16
1.4 Měření složek síly řezání	23
1.4.1 Přímé měření sil	23
2. Geometrie řezné hrany	25
3. Technologie zaoblení řezné hrany	28
3.1 Úprava řezných hran	30
3.1.1 Kartáčování	31
3.1.2 Omílání	31
3.1.3 Úprava laserem	32
4. Stanovení vlivu zaoblení ostří nástroje na dynamické zatížení soustavy	33
4.1 Volba obráběcího stroje	34
4.2 Hliníková slitina	35
4.3 Volba řezného nástroje	36
4.3.1 Stanovení velikosti zaoblení ostří nástroje	37
5. Měření jednotlivých složek síly řezání	39
6. Stanovení zatížení soustavy SNO	42
6.1 Stanovení vlivu opotřebení na velikost řezného odporu	42
6.2 Stanovení vlivu zaoblení hrany na velikost řezného odporu	45
6.3 Stanovení vlivu posuvu na velikost řezného odporu	50
7. Zhodnocení	54
Závěr	56

Seznam zkratek a symbolů

Zkratky	Popis	Jednotky
A	tažnost	[%]
A _D	jmenovitý průřez třísky	[mm ²]
ČSN	česká technická norma	[-]
F	síla řezání	[N]
F [‘]	třecí síla	[N]
F _c	řezná složka síly	[N]
F _f	posuvová složka síly	[N]
F _n	normálová síla	[N]
F _p	pasivní složka síly	[N]
F _s	smyková složka síly	[N]
F _t	přítlačná síla	[N]
HB	tvrdost podle Brinella	[-]
N	normálová síla	[N]
PKD	polykrystalický diamant	[-]
PVD	fyzické vakuové pokovení	[-]
R	řezný odpor	[N]
R [‘]	reakční řezný odpor	[N]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
S-N-O	soustava stroj, nástroj, obrobek	[-]
SK	slinutý karbid	[-]
U	rozšířená nejistota	[-]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
a _p	hloubka řezu	[mm]
f	posuv	[mm]
h, b, l	rozměry nástrojového držáku	[mm]
k _c	měrný řezný odpor	[N.mm ⁻²]
k _u	koeficient rozšíření	[-]
m _c	Kienzlův exponent	[-]
p	pravděpodobnost pokrytí	[%]
r _ε	nástrojový poloměr špičky	[mm]
r _n	poloměr zaoblení ostří	[μm]
s	tloušťka vyměnitelné břitové destičky	[mm]
s(x)	výběrová směrodatná odchylka	[-]
\bar{x}	výběrový průměr	[-]
v _c	řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
v _f	posuvová rychlost	[mm.min ⁻¹]
x ^{Fc}	exponent z empirického vztahu pro výpočet řezné síly	[-]
x _i	jednotlivé naměřené hodnoty	[-]
y ^{Fc}	exponent z empirického vztahu pro výpočet řezné síly	[-]

α_0	úhel hřbetu nástroje v ortogonální rovině	[°]
γ_0	úhel čela nástroje v ortogonální rovině	[°]
Φ, φ	úhel smykové roviny	[°]
κ_r	úhel nastavení hlavního ostří	[°]
μ	úhel tření	[°]
ε	úhel rozevření špičky hrotu	[°]
λ	úhel sklonu ostří	[°]

Úvod

Rozvoj v oboru třískové obrábění je v současné době důležitý hlavně z hlediska zvýšení produktivity a snížení nákladů. Jsou kladeny stále větší nároky na řezné nástroje, obráběcí stroje a celkový řezný proces, který je doprovázen tvorbou zatěžujících sil.

Znalost velikostí a charakteru řezných sil je nezbytným předpokladem k posouzení vhodnosti technologie, navržené k výrobě zejména sériového typu. K optimálnímu využití možností drahého obráběcího stroje a k dosažení maximální ekonomické efektivnosti výrobního procesu. Přetěžování stroje naopak vede k nestabilitě procesu, snížení životnosti stroje i nástroje. Pro soustavu stroj, nástroj, obrobek, přípravek je důležité dosažení minimálních řezných sil a přenosu tepla do nástroje, díky tomu dochází ke zvyšování rozměrové přednosti a kvality obráběného povrchu.

V současnosti existují metody, kterými lze tyto síly zaznamenávat. Díky nim vznikají řady experimentálních analýz sloužící k navrhování a ověřování důležitých aspektů řezného procesu. Těmi je i vliv zaoblení řezné hrany nástroje na dynamické zatížení soustavy řešené v experimentální části této práce. V literaturách je nejčastěji zaoblení řezné hrany a její vliv na řezný proces řešeno u obrábění při nízké hodnotě tloušťky nedeformované třísky vůči poloměru zaoblení řezného nástroje, nebo je řezná hrana brána jako ideální ostří. Díky tomu bylo v experimentální části této práci použito hodnot pro běžný řezný proces.

1. Současný stav obrábění hliníku a jeho slitin

1.1 Strukturní a fyzikální vlastnosti hliníku a jeho slitin

Hliník je jedním z nejrozšířenějších prvků na zemi, který se nejčastěji používá v chemickém a potravinářském průmyslu, v dopravě nebo jako elektrovedný materiál. Slitiny hliníku s ocelí patří díky jejich nízkým hmotnostem mezi nejpoužívanější konstrukční materiály. Hliník má plošně centrovanou kubickou mřížku, díky které má dobré plastické vlastnosti za tepla i za studena. [1]

Tab. 1.1 Hodnoty materiálové charakteristiky [1]

Fyzikální vlastnosti	
Hustota	2,6989 g.cm ⁻³ (při 20 °C)
Teplota tavení	660,4 °C
Tepelná vodivost	235 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ (při 20 °C)
Mechanické vlastnosti	
Tvrdost	20 HB
Tažnost	20-30%
Mez pevnosti v tahu	70 [Mpa]
Mez kluzu	20 [Mpa]

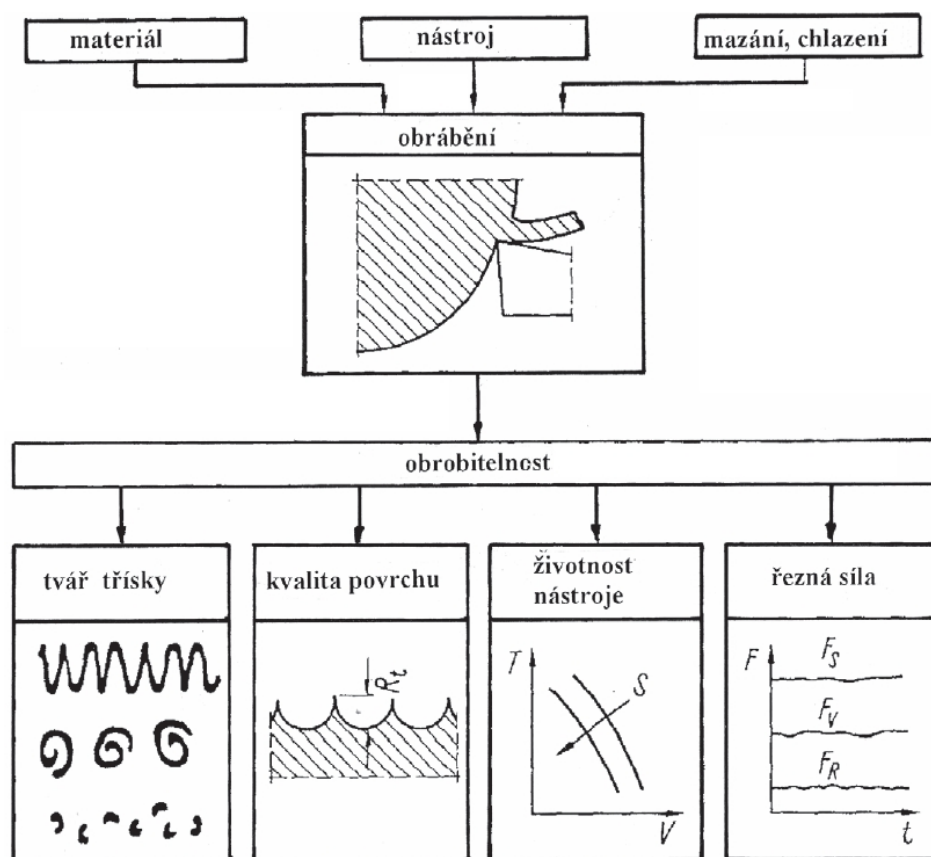
Složení hliníkových slitin se řídí požadovanými vlastnostmi. Podle složení a způsobu jakým dostanou jednotlivé slitiny pevnost, rozlišujeme slitiny hliníku na nevytvrzené např. Al-Mg, Al-Mn a vytvrzené např. Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg. Slitinám nevytvrzeným dávají pevnostní vlastnosti jen legující složky a stupeň zpevnění za studena. Vytvrzené slitiny hliníku získávají své pevnostní vlastnosti tepelným zpracováním. [2]

Čistý hliník má nízkou pevnost. Pro zvýšení mechanických vlastností jsou do hliníku nejčastěji přidávány přísady Si, Cu, Mg a Zn. Nejznámější slitinou je slitina mědi s hořčíkem známé jako dural vyznačující se velmi dobrou pevností 350-400 MPa, tvrdostí 100-120 HB a díky tomu i dobré obrobiteľností. Nedostatkem slitin hliníku je jejich nízká tvrdost. [1]

1.2 Proces a produktivita obrábění hliníku

1.2.1 Obrobitelnost hliníku a jeho slitin

Obrobitelnost je technologická vlastnost daného materiálu, která charakterizuje jeho vhodnost k obrábění. Zahrnuje vliv mechanických a fyzikálních vlastností materiálu, chemického složení, tepelného zpracování, struktury a způsob výroby polotovaru na kvalitativní, kvantitativní a ekonomické výsledky procesu řezání. [10]



Obr. 1.1 Parametry charakterizující obrobitelnost [1]

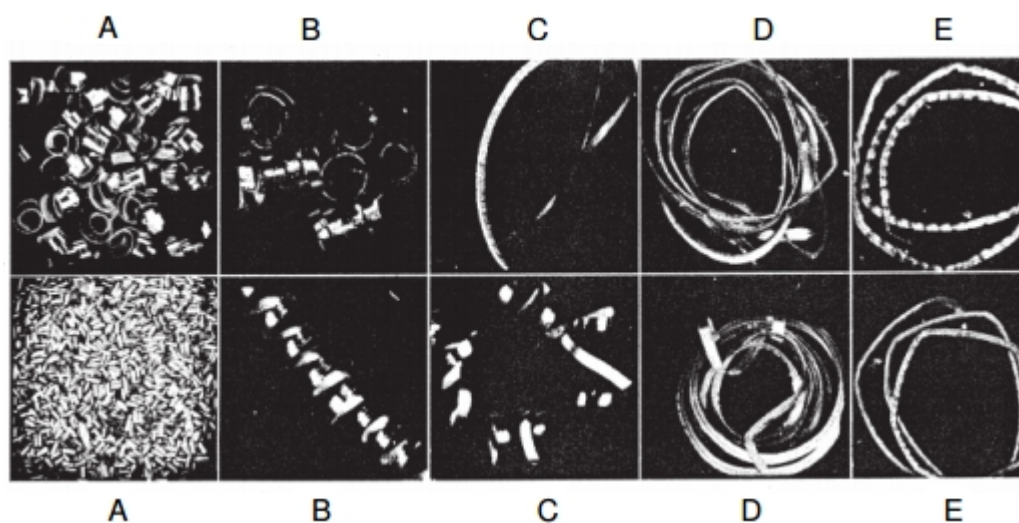
Obrábění hliníku a jeho slitin vyžaduje zcela odlišný přístup v porovnání s obráběním oceli nebo litiny. Je nutno vytvořit optimální pracovní podmínky z hlediska řezného materiálu, tvarů použitých obráběcích nástrojů a jejich geometrie břitů. Ve srovnání s ocelmi stejné pevnosti jsou řezné síly u hliníkových slitin výrazně menší. Podstatným parametrem při hodnocení obrobitelnosti je vizuální tvar třísky (viz. Obr. 1.2). Slitiny hliníku lze z hlediska obrobitelnosti rozdělit do tří skupit. Na slitiny slévárenské, tvářené a slitiny určené pro obrábění (automatové). Automatové slitiny jsou legovány s nízkou teplotou tání prvky jako Pb, Bi a Sb zlepšující podmínky pro vznik drobné lámavé třísky při obrábění. [1]

1.2.2 Proces obrábění

Obrobitelnost hliníkových slitin je závislá na složení a stavu struktury konkrétních slitin. Nevytvrzené a vytvrzené slitiny v měkkém stavu bez Si mají silný sklon k mazání a tvorbě nárůstků. [2] Nejběžnější typ hliníkových slitin představují podeutektické s obsahem Si pod 13%. Pro zamezení ulpívání částic materiálu na břitu a zvýšení kvality obrobené plochy, je při obrábění hliníku nutno použití procesní kapaliny. Spolu s vyššími řeznými rychlostmi přispívají ke zvýšení výkonnosti bez negativního vlivu na životnost nástroje.

Tab. 1.2 Řezné podmínky pro vhodnou tvorbu tvarů třísek [1]

Označení skupiny	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv f [mm]	
		dolní snímek	horní snímek
A	120	0,066	0,152
B	30	0,152	0,264
C	120	0,152	0,264
D	120	0,152	0,264
E	120	0,152	0,264

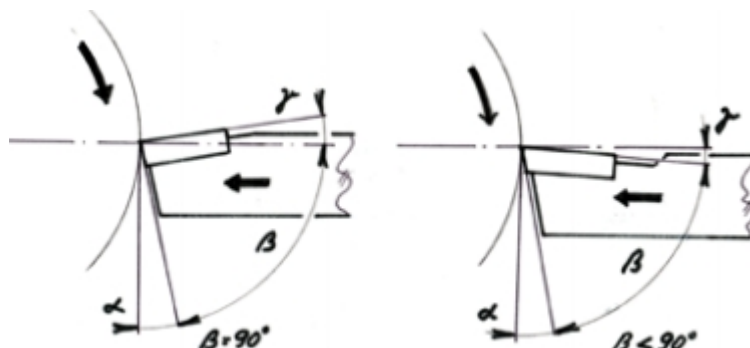


Obr. 1.2 Rozdělení třísek do skupin dle tvaru [1]

- A - elementární tříska slitiny hliníku s mědí a bismutem,
- B - stočená vinutá tříska slitiny hliníku s mědí a hořčíkem,
- C - plynulá tříska obloukovitá slitiny hliníku s hořčíkem a křemíkem,
- D - plynulá tříska spirálová slitiny hliníku s manganem a hořčíkem
- E - stužková smotaná tříska v podstatě čistého hliníku.

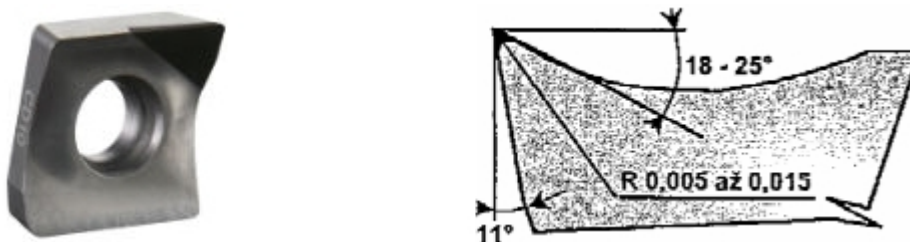
1.2.3 Řezné nástroje

Pro obrábění slitin hliníku se nejčastěji volí nástroje s VBD s velmi pozitivní geometrií břitu (viz. Obr. 1.3) a všeobecně velký úhel čela $18-25^\circ$ (viz. Obr. 1.4), který zaručuje dobrý odchod třísky a zamezí vytváření nárůstků. [3]



Obr. 1.3 Rozdíl negativní a pozitivní geometrie řezné destičky [5]

Nástroje k obrábění hliníkových slitin řadíme dle ISO do materiálové třídy N značené zelenou barvou, která je určena pro měkké neželezné kovy s tvrdostí 30-150HB. Vhodné obráběcí materiály jsou nejčastěji voleny z karbidové třídy pro slitiny s obsahem Si nižším než 13% bez povlaků, kterým je firmou Sandvik označena karbidová třída H10. U slitiny hliníku s obsahem křemíku nad 13% se dramaticky snižuje trvanlivost karbidových tříd, proto je nutné použití PVD povlaků popř. použitím hrotu z polykrystalického diamantu. [3, 4]

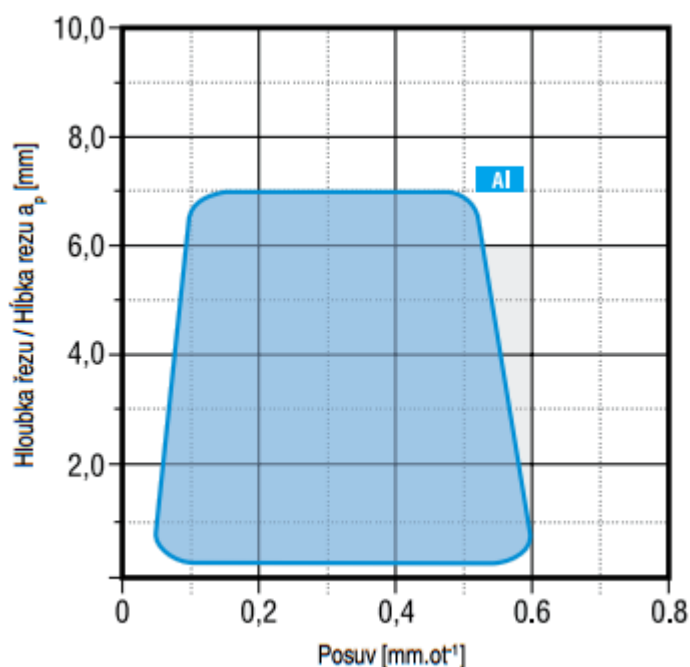


Obr. 1.4 Hrot polykrystalického diamantu, geometrie nástroje pro Al slitiny [3,7]

Tendence k nalepování hliníku při obrábění stoupá s rostoucí zrnitostí karbidu wolframu (WC), obsahu kobaltu (Co), drsností řezné hrany a povrchu řezného nástroje. Proto již existuje úprava řezné hrany diamantovým mikroleštěním, díky které se snižuje drsnost adheze. Materiál destiček pro obrábění hliníkových slitin musí zachovávat dobrou houževnatost při dostatečné otěruvzdornosti. Tyto požadavky v maximální míře splňuje submikronový substrát Pramet HF7 a pro hliníkové slitiny s vyšším obsahem křemíku Pramet Diadur 8016. [6]

1.2.4 Řezné podmínky

Nastavení vhodných řezných rychlostí při obrábění je základem pro hospodárnost obráběcího procesu. Lze jich dosáhnout pomocí výpočtů ze vzorců, určení z normativů nebo pomocí počítačových programů. Hliníkové slitiny vyžadují pro optimální řezné podmínky výkonné stroje, které jsou schopny dosahovat požadovaných řezných rychlostí. Starší literatury uvádějí $v_c < 1200 \text{ m.min}^{-1}$ pro slinuté karbidy a $< 1500 \text{ m.min}^{-1}$ pro PKD nástroje. V současné době se uvádějí řezné rychlosti $< 2000 \text{ m.min}^{-1}$ pro nepovlakované nástroje až 2500 m.min^{-1} při nasazení polykrystalického diamantu. Důležitým faktorem je při obrábění hliníkových slitin hloubka řezu, která by se měla odvíjet od posuvu tak, aby při nízkém posuvu nedocházelo spíše k silnému tření a tím přehřívání nástroje (viz. Obr. 1.5).



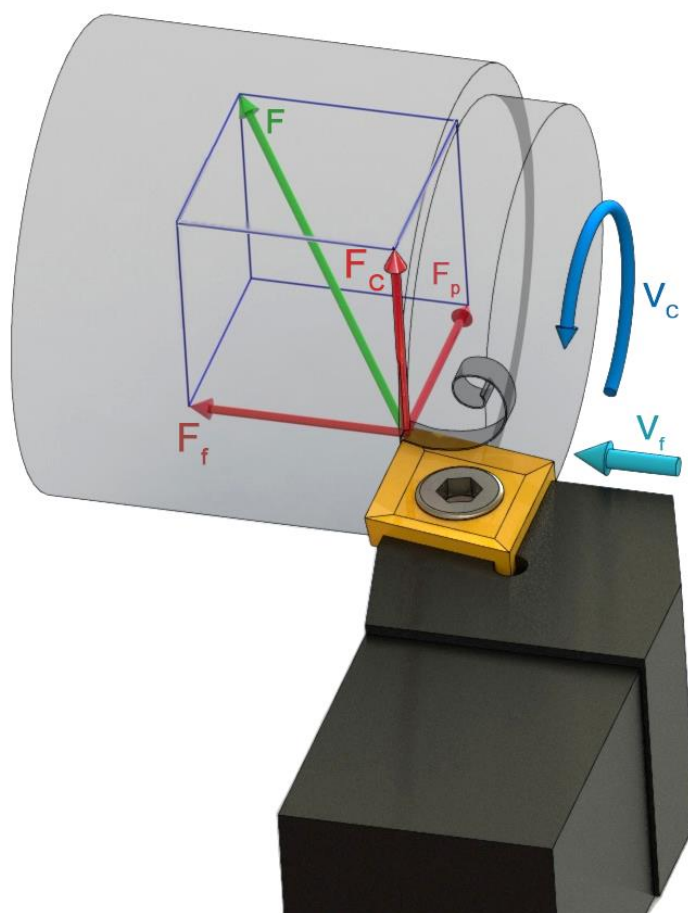
Obr. 1.5 Diagram pro volbu parametrů Al-slitin [3]

Tab. 1.3 Orientační řešení řezných podmínek [3,8]

Nepovlakované materiály H10 Sandvik pro materiálovou skupinu N Al-slitin			
Typ operace	Posuv f [mm]	Šířka záběru a_p [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
Hrubování	0,4-0,8	5,0	250-1650
Dokončování	0,1-0,2	1,5	2350-2650
Materiály s diamantovým povlakem ND 100 pro skupinu N Al-slitin			
Hrubování	0,1-2	0,1-5	500-2000

1.3 Dynamické zatížení soustavy a měření složek síly řezání

Řezný proces se realizuje jako výsledný proces působení složité soustavy sil mezi nástrojem a obrobkem (viz. Obr. 1.6). Poznání těchto silových poměrů procesu řezání umožňuje získat přehled o mechanickém namáhání soustavy obrábění, a tím i podklady pro řešení celé technologické soustavy jak z hlediska pevnosti, tak i její tuhosti včetně dynamické stability řezného procesu. Dále je možné získat podklady pro určení příkonu obráběcího stroje, optimalizace řezných podmínek s ohledem na průběh obrábění a stabilitu břitu nástroje. [9, 10]



Obr. 1.6 Složky síly řezání při soustružení

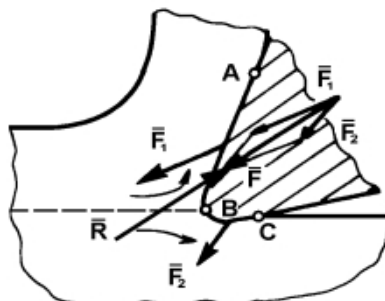
Výsledná síla řezání vyvolaná působením řezné části na obrobek se značí symbolem F (viz. Obr. 1.6), a je umístěna do jednoho hlavního bodu ostří. Naopak řezný odpor R je silové působení obrobku na nástroj. Pro podmínku rovnováhy platí: [11]

$$F = -R \text{ [N]} \quad (2.1.1)$$

F – výsledná síla řezání [N],

R – řezný odpor [N].

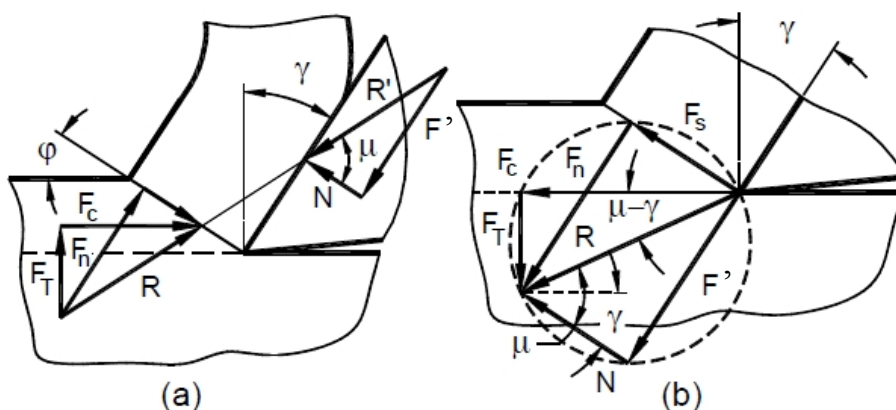
Pro analýzu silových poměrů řezného procesu se výsledná síla řezání F rozkládá do příslušných složek. Aktivní složky F_1 a pasivní složky F_2 (viz. Obr. 1.7). Aktivní složka řezné síly lze rozložit na řeznou složku síly F_c a posuvovou složku síly F_f . Pasivní složka síly se dále nerozkládá a značí se F_p . [11]



Obr. 1.7 Síla řezání a její rozklad při soustružení [11]

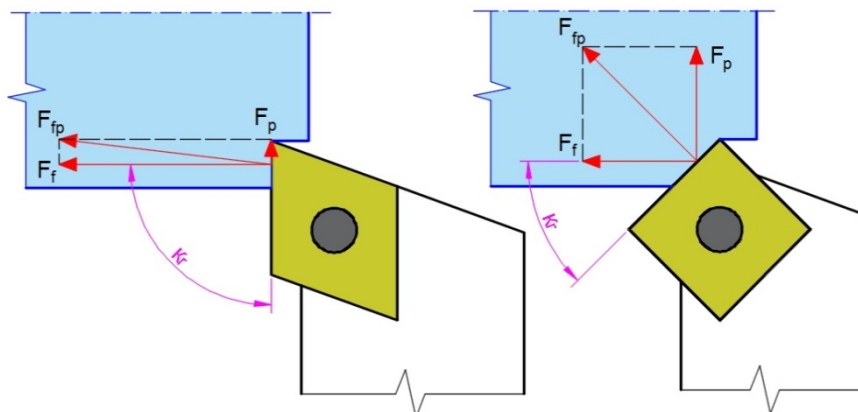
Největší význam má řezná (tangenciální) složka síly F_c , která je základem stanovení omezujících podmínek při volbě řezných parametrů. Její velikost je z velké části ovlivněna kontaktem a velikostí třetí mezi obrobkem a nástrojem resp. Mezi třískou a čelem nástroje, utvářením a efektem lámání třísky. Působí ve směru hlavního řezného pohybu. Posuvová (axiální) složka řezné síly F_f působí ve stejném směru jako posuv nástroje a směr osy obrábění. Je kolmá na směr tangenciální i radiální složky. Pasivní složka řezné síly F_p působí radiálně ve směru kolmém k obráběné ploše. Obvykle je funkcí přísuvu anebo tlaku, kterým je přitlačený nástroj k obrobku. Slouží na určení tuhosti obráběcího stroje a všeobecně na analýzu dynamického chování.

Dle úhlu roviny stříhu ϕ , lze znázornit (akční a reakční) protilehlé síly R a R' . Kdy R' je síla nástroje rozdělená do třecí síly F' , normálové síly N a úhlem tření μ . Naopak R působící obrobkem řešené podél smykové roviny silou F_s , její normálovou silou F_n , řeznou silou F_c a přitlačnou silou F_t (viz. Obr. 1.8).



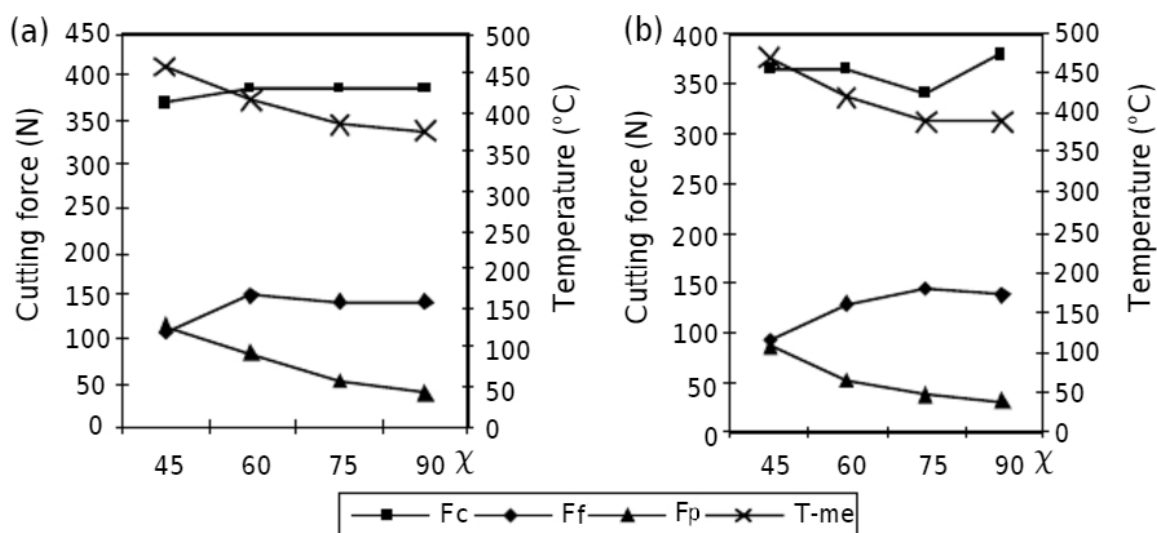
Obr. 1.8 Silový diagram a) originální b) modifikovaný [18]

Poměr velikostí jednotlivých složek je dán především technologií obrábění a geometrií nástroje. Při podélném soustružení je pro $\kappa_r = 45^\circ$ poměr $F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,25$. S měnícím se úhlem nastavení hlavního ostří κ_r se mění i výslednice složek sil F_p a F_f [9, 12]



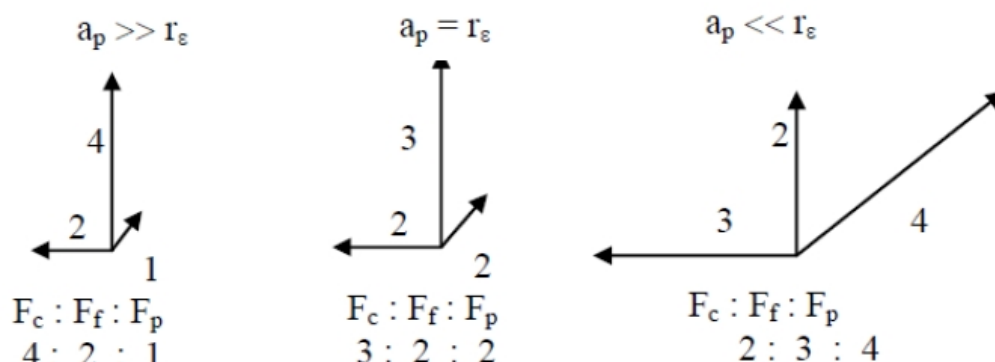
Obr. 1.9 Vliv úhlu nastavení κ_r na velikost pasivní a posuvové složky síly

Grafické znázornění vlivu úhlu nastavení na teplotu a velikosti jednotlivých složek sil (viz. Obr. 1.10) značí, že při posuvu $f = 0,2 \text{ mm}$, řezné rychlosti $v_c = 113 \text{ m.min}^{-1}$ a úhlu nastavení je $\kappa_r = 45^\circ$ jsou složky sil F_p a F_f téměř stejné přičemž při maximálním úhlu $\kappa_r = 90^\circ$ je pasivní složka F_p minimální. Se zmenšením úhlu nastavení se v případě přímého břitu snižuje tloušťka třísky a zvětšuje využitá délka břitu. Axiální řezné síly se zvyšují s narůstající hodnotou úhlu nastavení a způsobují zvýšení tlaku na obrobek.



Obr. 1.10 Vliv úhlu nastavení κ_r na složky řezných sil a) $\gamma = 6^\circ$ b) $\gamma = 12^\circ$ [19]

Protichůdný vliv na velikost řezné síly má oproti úhlu nastavení hlavního ostří κ_r poloměr špičky nástroje r_ϵ , který mění poměr jednotlivých složek v závislosti na hloubce odebíraného materiálu (viz. Obr. 1.11).



Obr. 1.11 Teoretický vliv poloměru špičky nástroje na poměr složek síly řezání [9]

Pokud je horní strana (čelo) kolmá k obráběnému povrchu, je úhel čela nástroje považován za negativní. Řezné síly jsou směřovány na tělo nebo nejsilnější část nástroje. Naopak pokud je řezná hrana více odkloněna vzhledem k povrchu obrobku, je úhel čela nástroje považován za pozitivní. Řezné síly jsou soustředěny na řeznou hranu nástroje, která není tak pevná jako tělo nástroje. [35]

Výpočet vybraných složek výsledné síly řezání F je možné provést na základě empirických závislostí. Hodnoty konstant a exponentů jsou zjištěny při experimentálním měření a udávány v tabulkách. Pro podélné soustružení válcové plochy se uvádí mocninové závislosti: [10]

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad [N] \quad (2.1.2)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \quad [N] \quad (2.1.3)$$

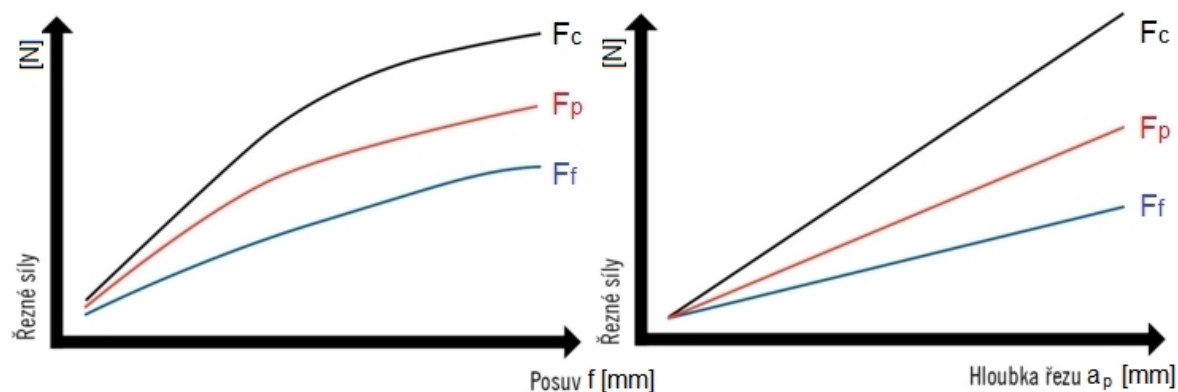
$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \quad [N] \quad (2.1.4)$$

- $C_{F_c}, C_{F_p}, C_{F_f}$ materiálové konstanty [-]
- $x_{F_c}, x_{F_p}, x_{F_f}$ exponenty vlivu hloubky třísky a_p [-]
- $y_{F_c}, y_{F_p}, y_{F_f}$ exponent vlivu posuvu f [-]

Pro vypočtené síly F_c, F_p, F_f , se celková řezná síla stanoví ze vztahu: [10]

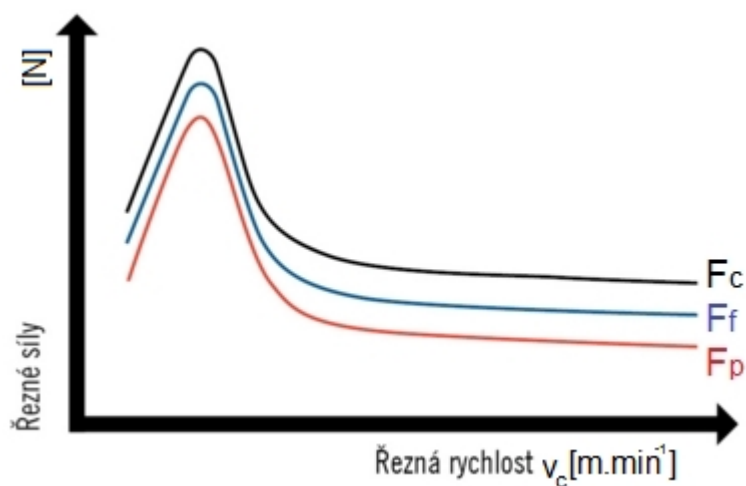
$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad [N] \quad (2.1.5)$$

Změny hloubky řezu, posuvu a rychlosti mají odlišný účinek z hlediska zatížení působící na nástroj. Závislosti řezných složek sil F_c , F_p , F_f mají při soustružení s rostoucím posuvem stoupající tendenci, avšak nelineárně oproti velikosti hloubky řezu. Vyšší posuvy nezvyšují řezné síly ve stejném rozsahu jako hloubky řezu, protože vyšší posuv zvětšuje tloušťku třísky, ale nezvětšuje délku řezné hrany nástroje v záběru, které vede k významnému zvýšení zatížení na řezné hraně. [14]



Obr. 1.12 Průběh složek sil s měnícím se posuvem, hloubkou řezu [14]

Mimo zmíněné řezné podmínky ovlivňuje řezná rychlost v podstatě všechny tři složky stejně. Její vliv na velikost řezné síly je srovnatelný s jejím vlivem na měrný řezný odpor. S rostoucí řeznou rychlostí měrný řezný odpor klesá. Tato závislost souvisí se změnou velikosti oblasti primární plastické deformace vlivem rostoucí řezné rychlosti. [11]



Obr. 1.13 Průběh složek sil s měnící se řeznou rychlostí [14]

Zvyšování řezné rychlosti přináší s sebou tepelně odpevňující děje v odřezávaném materiálu, které snižují jeho řezný odpor, a tím dochází k poklesu řezných sil. S rostoucí řeznou rychlostí se měrná řezná síla zmenšuje, a to až do minima při řezné rychlosti charakteristické pro daný obráběný materiál, poté má síla řezání tendenci růstu společně se zvyšující se řeznou rychlostí.

Měrná řezná síla k_c (měrný řezný odpor) je vyjádřena řeznou silou, vztaženou na jednotku plochy řezu a je definována jako poměr řezné složky F_c a plochy jmenovitého průřezu třísky A_D .

Lze ji stanovit ze vztahu: [10]

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} [N \cdot mm^{-2}] = [MPa] \quad (2.1.6)$$

F_c – řezná složka síly řezání [N]

A_D – jmenovitý průřez třísky [mm^2]

Lze tedy říct, že se zmenšující se tloušťkou třísky měrný řezný odpor roste. Jmenovitý průřez odebírané třísky lze spočítat ze vztahu: [10]

$$A_D = h \cdot b = a_p \cdot f [mm^2] \quad (2.1.7)$$

h – tloušťka třísky [mm]

b – šířka třísky [mm]

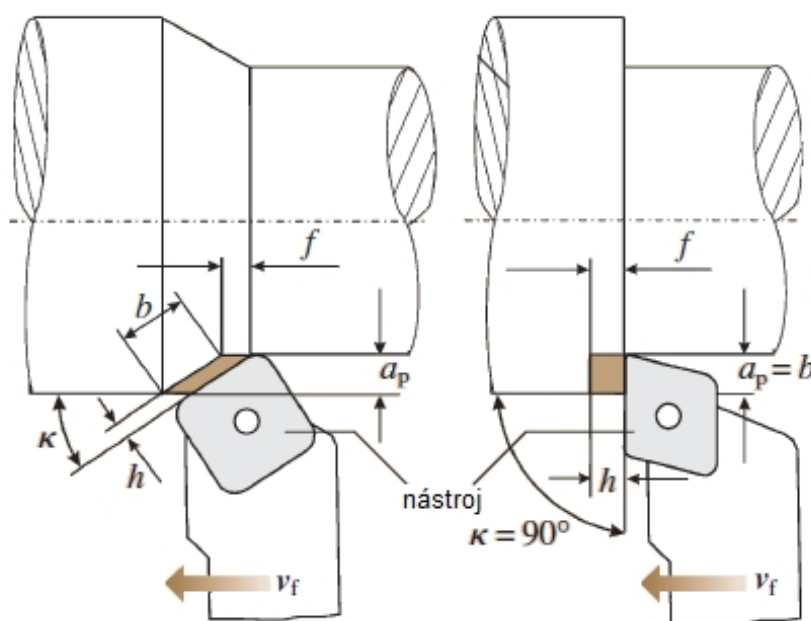
f – posuv za otáčku [mm]

a_p – hloubka řezu [mm]

V případě že úhel nastavení κ_r je roven 90° , tloušťka třísky je rovna posuvu za otáčku a šířka třísky je rovna hloubce řezu. V jiném případě lze odvodit (viz. Obr. 1.14).

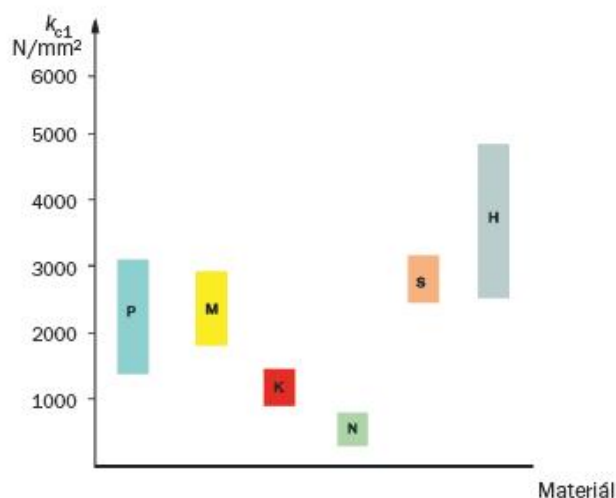
$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa} [mm] \quad (2.1.8)$$

$$h = f_{ot} \cdot \sin \kappa [mm] \quad (2.1.9)$$



Obr. 1.14 Identifikace průřezu třísky při soustružení

V případě $k_{c1.1}$ se jedná o řeznou sílu potřebnou pro úběr materiálu obrobku s šířkou záběru 1 mm a hloubkou 1 mm. Hodnota k_c se liší pro všech šest materiálových skupin. Mění se také v rámci každé skupiny.



Obr. 1.15 Velikosti měrných řezných sil dle druhů obráběného materiálu [14]

Se známou hodnotou $k_{c1.1}$, m_c a úhlem nastavení 90° lze použít zjednodušený vzorec pro předběžné výsledky v případě, že chceme mít představu, s jakými řeznými silami bude proces obrábění pracovat: [20]

$$F_c = k_{c1.1} \cdot a_p \cdot f^{1-m_c} [N] \quad (2.2)$$

$k_{c1.1}$ – specifická řezná síla [$N \cdot mm^2$]

a_p – hloubka řezu [mm]

f – posuv za otáčku [mm]

m_c - Kienzlův exponent zohledňující kombinaci geometrie nástroje a materiálu obrobku [-]

Tab. 1.4 Ukázka konstant k_c a exponentů m_c pro železité materiály [20]

Řezná rychlost	$V_c = 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$						
Hloubka řezu	$a_p = 3 \text{ mm}$						
Materiál nástroje	SK P10						
Geometrie řezné hrany		α	γ	λ	ε	κ	r_ε
	Litina	5°	2°	0°	90°	70°	$0,8^\circ$
Materiál:	R_m [MPa]	$k_{c1.1}$	$1-m_c$	$k_{f1.1}$	$1-m_f$	$k_{p1.1}$	$1-m_p$
ČSN 11 500	559	1499	0,71	351	0,3	274	0,51
ČSN 11 700	824	1595	0,68	228	-0,07	152	0,1
ČSN 14 109	624	1726	0,72	318	0,14	362	0,47
ČSN 14 220	500	1411	0,7	406	0,37	312	0,5
ČSN 15 142	1138	1773	0,83	354	0,43	252	0,49
ČSN 16 343	1010	1686	0,82	291	0,37	284	0,72

1.4 Měření složek síly řezání

Proces řezání probíhá za působení síly řezání vyvolané ostřím řezného nástroje. Identifikace a analýza silového působení probíhá za účelem optimalizace technologických podmínek obráběcího procesu. Při studiu silových poměrů je nutno vycházet z podmínek rovnováhy sil. Samotné měření lze z experimentálního studia rozdělit na přímé a nepřímé stanovení síly řezání, složek síly řezání a momentů. Přímé měření složek síly řezání se zakládá na měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek během obrábění prostřednictvím dynamometrů, a nepřímé metody měření, které vycházejí převážně z výkonu elektromotoru obráběcího stroje. [13]

1.4.1 Přímé měření sil

Při měření je řezný nástroj upnut na snímací zařízení – dynamometr, který při zatěžování reaguje na vznik složek síly řezání a momentů vytvářením elektrického signálu odpovídajícímu velikosti působící síly. Dynamometry mají vysoké požadavky na citlivost, která je dána jako poměr eklektického výstupu na jednotku silového vstupu. Použití dynamometrů při obrábění indikuje přesné podmínky, které vznikají na řezném nástroji za dynamických situací, což je neocenitelné hodnocení i u obrobiteľnosti materiálu. Základními požadavky kladené na dynamometry jsou:

- tuhost dynamometrů,
- citlivost dynamometrů,
- stálost údajů dynamometrů,
- reprodukovatelnost údajů,
- konstrukce dynamometrů.

Dynamometr, jakožto měřicí přístroj, musí zaručit nezávislost měřicí veličiny na provozních vlastnostech přístroje. Přístroj musí zaručovat měření v požadovaném rozsahu s maximální přesností a nezávislost měřicí veličiny na provozních vlastnostech přístroje. [9, 13]

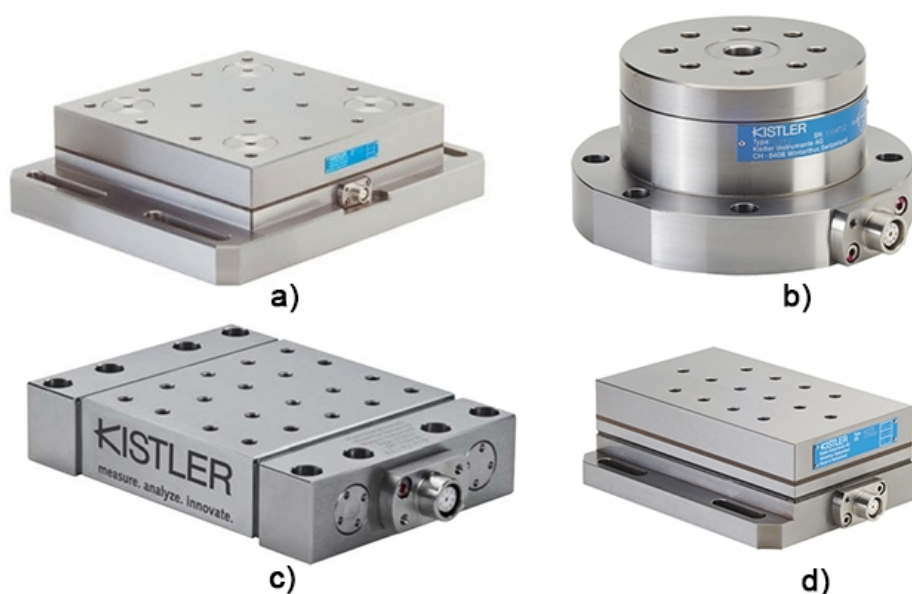
Aparatura na měření složek síly řezání se zpravidla skládá ze tří částí: [13]

1. Pružný člen – přebírá vnější zatížení a překonává jisté změny (deformace, změna polohy apod.).
2. Snímač – mění mechanickou veličinu změny pružného členu na hodnotu analogického parametru měřicí aparatury.
3. Přijímač – zesiluje, zpracovává signál snímače a velikost zatížení.

Z hlediska konstrukčního uspořádání a použité metody měření lze dynamometry rozdělit na:

- dynamometry s pružným členem (mechanický, pneumatický, indukční, kapacitní, elektrický),
- dynamometry bez pružného členu (hydraulický, uhlíkový, piezoelektrický).

Podle metody obrábění, na kterou jsou dynamometrická měřidla aplikována, se rozeznávají dynamometry pro operace soustružení, frézování, vrtání, broušení jako jsou vyráběny společností KISTLER (viz. Obr. 1.16). Dle počtu měřených složek silového zatížení je lze rozdělit na jednosložkové a vícesložkové. [13]



Obr. 1.16 Druhy dynamometrů společnosti KISTLER: a) pro frézování, b) pro vrtání, c) pro soustružení, d) pro broušení [15]

Pro stanovení vlivu zaoblení ostří nástroje na dynamickém zatížení soustavy byl použit třísložkový stacionární dynamometr s označením 919AA od společnosti KISTLER (viz. Obr. 1.16c). Tento piezoelektrický dynamometr patří mezi nejpoužívanější senzory silového zatížení. Pracuje na principu piezoelektrického jevu, což je schopnost krystalů generovat elektrické napětí při jejich deformaci. Tuto schopnost mají jen některé materiály např. krystaly SiO_2 , který je umístěn ve formě výbrusů do zásobníku. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly. Každý snímač se skládá ze tří elementů, které měří síly v jednotlivých směrech. [11]

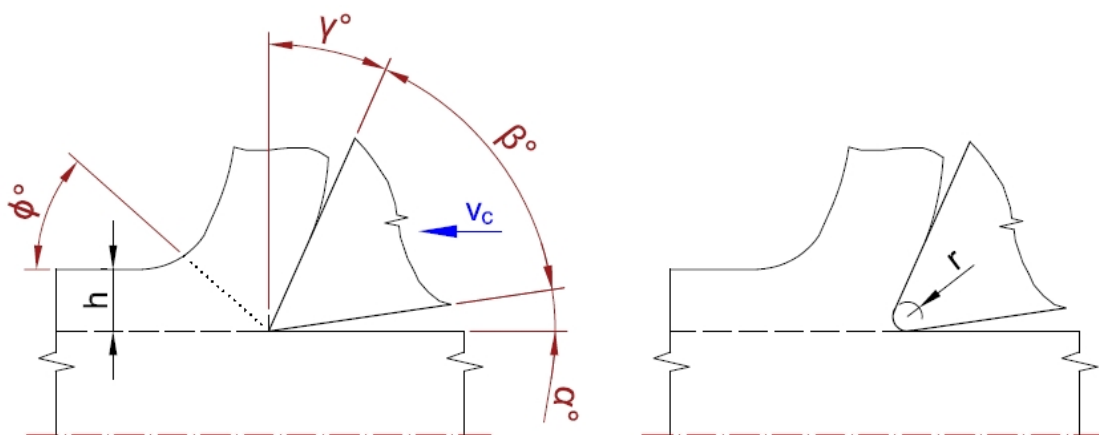
2. Geometrie řezné hrany

Geometrie nástroje zahrnuje tvar a rozměry z hlediska makrogeometrie i mikrogeometrie. Z makrogeometrického pohledu základní velikost a tvar řezné břitové destičky určující její pevnost. Mikrogeometrie nástroje je do jisté míry ovlivněna jak použitým řezným materiálem, tak i naneseným otěruvzdorným povlakem, který ovlivňuje drsnost povrchu a díky své tloušťce i poloměr zaoblení břitu. Řezné síly působící na velkou břitovou destičku vytvářejí menší zatížení než stejně velké síly působící na menší břitovou destičku.

Změna geometrie nástroje mění průběh oddělování obrobeného materiálu aktivním způsobem. Pokud například vzorec pro předvídání řezných sil indikuje, že výsledná mechanická zatížení budou vysoká, může obrábění s nástrojem s ostřejší geometrií snížit řezné síly a minimalizovat problém ještě předtím, než k němu dojde. [35]

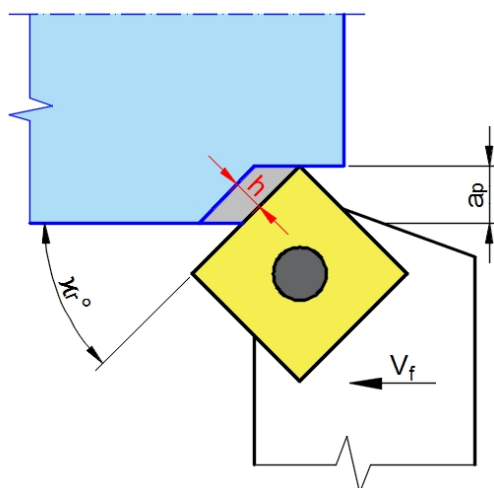
Základní geometrie řezného klínu může být znázorněna (viz. Obr. 2.1a), ale řezná hrana se v něm často idealizuje jako dokonalé ostří. Jestliže je poloměr zaoblení řezné hrany malý, dochází ke snižování velikosti řezných sil ve všech směrech. Díky tomu se usnadňuje průběh záběru a snižuje se velikost průhybu nástroje. Velikost řezné hrany je u broušených břitových destiček menší než u přímo lisovaných, což platí také pro břitové destičky s tenkým povlakem a destičky nepovlakované. Poloměr zaoblení je doporučen: [18]

- pro měkké slitiny hliníku 1-3 μm ,
- pro slitiny hliníku s křemíkem 5-10 μm ,
- pro oceli 15-20 μm ,
- pro titanové slitiny max. 30 μm .



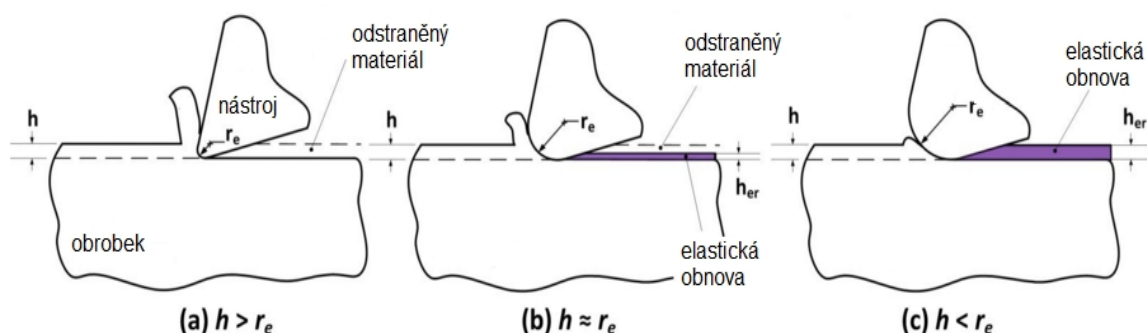
Obr. 2.1 Řezný klín s ideálně ostrou a zaoblenou řeznou hranou

Jak už bylo v úvodu zmíněno, velikost zaoblení řezné hrany a její vliv na řezný proces je často řešeno pro případy, kdy je tloušťka nedeformované třísky (h) vůči poměru zaoblení hrany řezného nástroje nízká. Při soustružení k tomu dochází za použití nízkých posuvových rychlostí, protože tloušťka třísky je definována jako tloušťka nedeformované třísky měřená kolmo k zabíracímu ostří a při úhlu nastavení $\kappa_r = 90^\circ$ se rovná posuvu za otáčku.



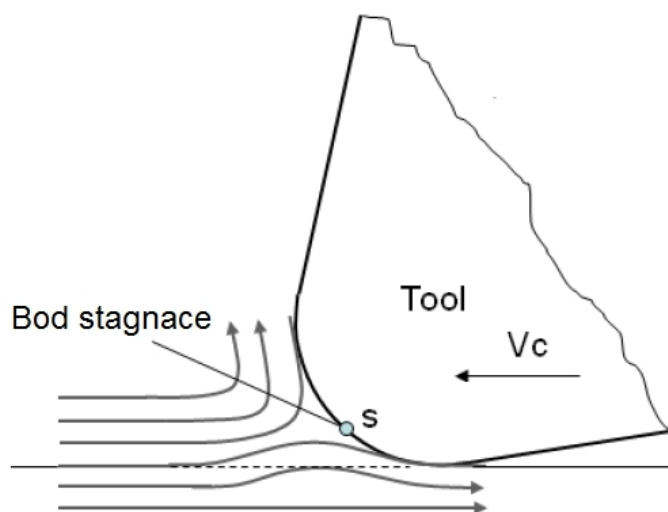
Obr. 2.2 Tloušťka třísky

Důsledkem malého rozměru třísky je to, že proces tvoření třísky je přesunut z koncentrovaného smyku do oblasti mikro-vytlačování. Když nedeformovaná tloušťka třísky je menší než poloměr ostří na noži, je skutečný úhel čela velice negativní, takže namísto smykové deformace dochází k mikro-vytlačování materiálu. Přitom je relativně velký objem materiálu převeden do stavu plně plastického, aby malé množství materiálu odešlo ve tvaru třísky. To je důvod, proč exponenciálně roste měrná energie se zmenšováním tloušťky nedeformované třísky (viz. Obr. 2.3). [34]



Obr. 2.3 Vliv poměru zaoblení na procesu obrábění [21]

Přítomnost poloměru břitu generuje v průběhu procesu řezání materiálu proudové pole (viz. Obr. 2.4), ve kterém je znázorněna stagnace bodem S. Nad tímto bodem je předpoklad odvodu materiálu do třísky, zatímco pod bodem stagnace je to proud do obrobku.



Obr. 2.4 Znázornění stagnačního bodu [22]

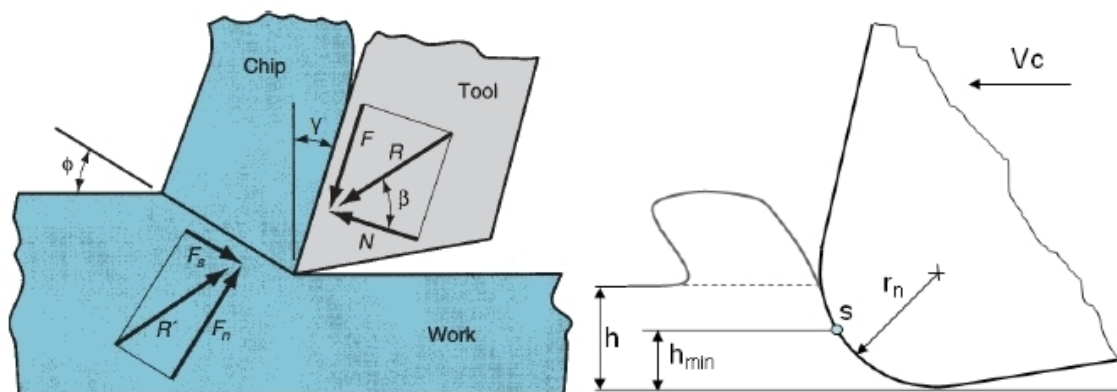
Jak již bylo zmíněno, pod bodem stagnace nedochází k tvorbě třísky ale drhnutí nástroje po obrobku. Z tohoto důvodu se definuje výška minimální tloušťky třísky právě od tohoto bodu (viz. Obr. 2.5b), která se vypočítá na základě poloměru ostří (r_n) nástroje a úhlem tření (μ) mezi nástrojem a kontaktní třískou. Ten lze vyvodit ze vzorce pro výpočet úhlu smyku Φ za použití výsledného úhlu β , síly R a úhlu sklonu γ (viz. Obr. 2.5a). [22]

$$\text{Úhel smyku:} \quad \Phi = 45 + \frac{\gamma}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (3.2)$$

$$\text{Úhel výsledné síly R:} \quad \beta = 2 \cdot 45 + \gamma - 2 \cdot \Phi \quad (3.3)$$

$$\text{Úhel tření:} \quad \mu = \tan \beta \quad (3.4)$$

$$h_{min} = r_n \left[1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2} \right) \right] \quad (3.5)$$



Obr. 2.5 a) Síly působící v ortogonálním řezu, b) ukázka minimální hloubky třísky [22, 23]

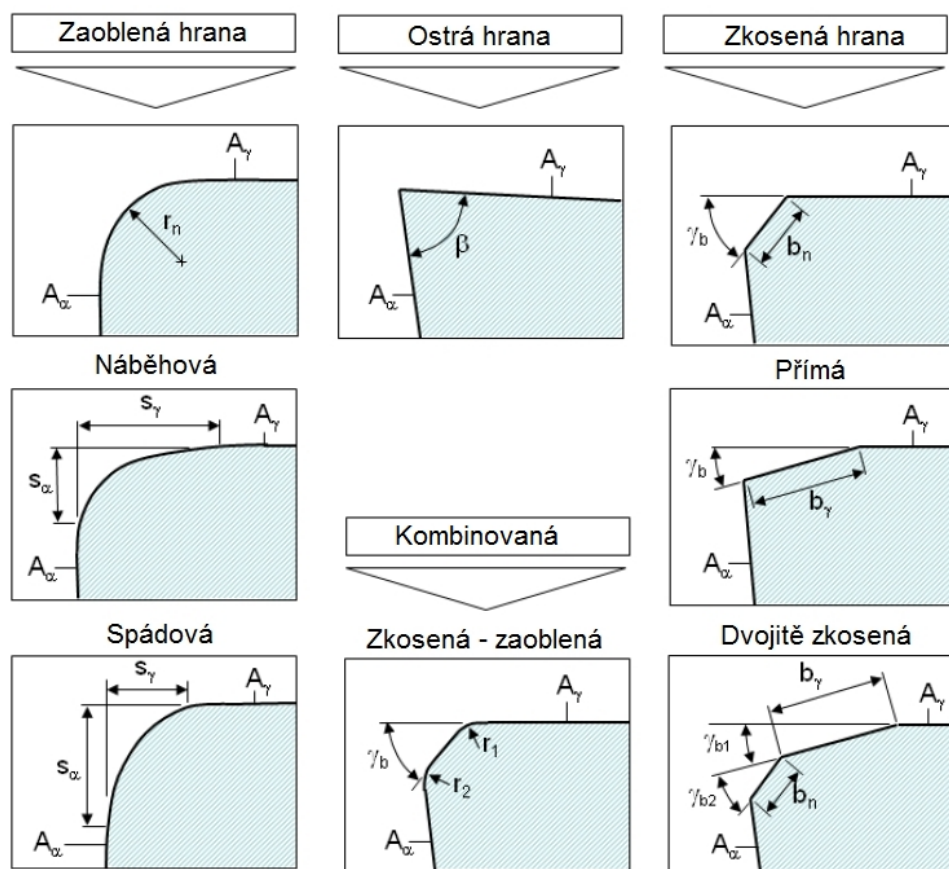
3. Technologie zaoblení řezné hrany

Pro určení formy břitu výrobci poskytují množství okrajových geometrií nástroje, které se obvykle označují jako příprava břitu (viz. Obr. 3.1), který znázorňuje hlavní typy konstrukce přípravy hrany používané u většiny komerčních řezných nástrojů. Obecně existují tři typy: ostré hrany, zaoblené hrany a zkosené hrany. [24]

Ostré hrany jsou definovány teoretickým průsečíkem hrany čela a hřbetu. Při jejím použití se dosahuje minimální deformace odřezávané vrstvy, snižuje se velikost řezných sil a omezuje se vnik nárustků. S vyšší koncentrací sil na menší plochu dochází ke snížení pevnosti ostří, a proto se využívá především pro obrábění slitin Al. [24]

Břit se zkosenou hranou zvětšuje pevnost ostří a odolnost proti mechanickému opotřebení, protože zvětšuje v bezprostřední blízkosti úhel břitu. Odolnost proti křehkému porušení nebo lomu celého břitu roste. [24]

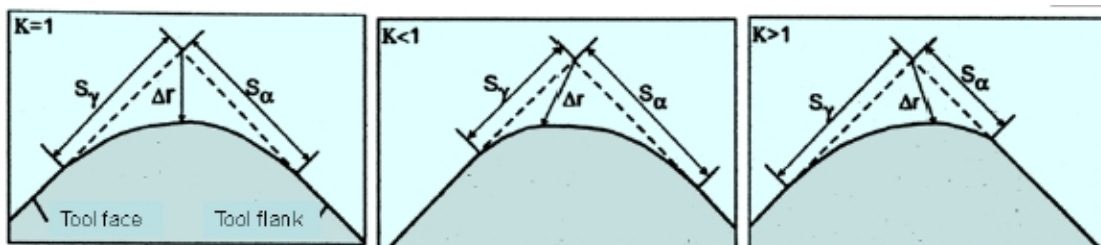
Břit se zaoblenou hranou snižují mikronerovnosti řezné hrany. Jedná se o zaoblení pod velmi malým poloměrem. Díky této úpravě ostří se dosahuje zvýšené odolnosti proti mechanickému porušení řezné hrany využívané pro většinu druhů materiálů. [24]



Obr. 3.1 Způsoby provedení ostří [22]

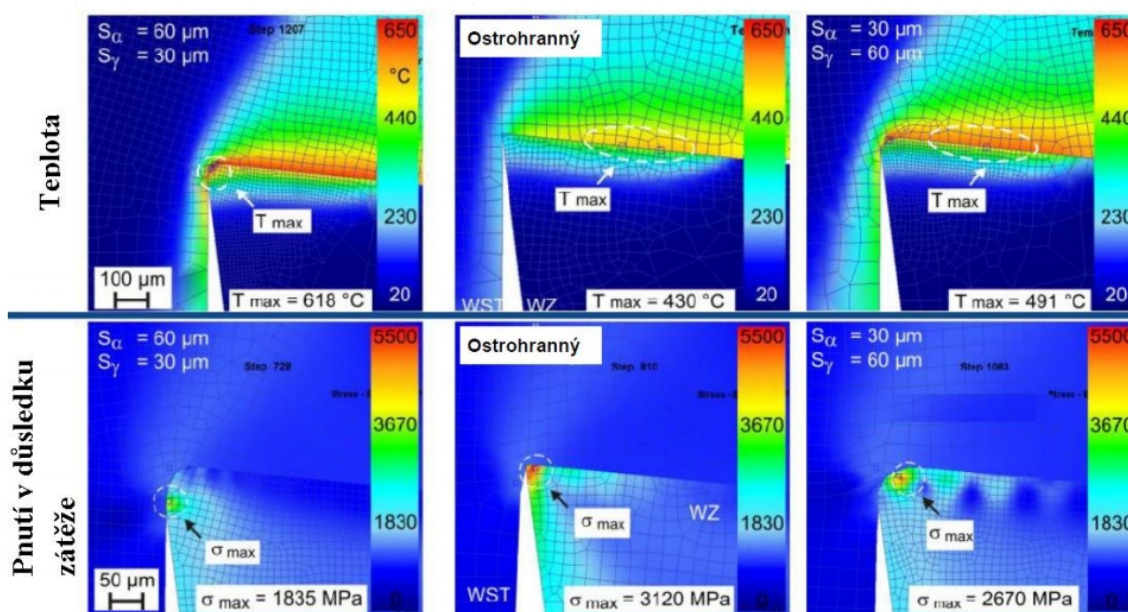
Zaoblení je dáno poloměrem mezi plochou čela a plochou hřbetu. Pro popis tvaru zaoblení se užívá takzvaný K faktor, který se počítá jako podíl poloměru zaoblení na čele S_γ a poloměrem zaoblení na hřbetě S_α (viz. Obr. 3.2). [22]

$$K = \frac{S_\gamma}{S_\alpha} \quad (4.1)$$



Obr. 3.2 Tvary řezné hrany pro a) K faktor =1, b) $K<1$, c) $K>1$ [22]

Je-li zaoblení souměrné, je $K = 1$. Pokud je poloměr zakřivení na jedné straně větší K faktor je menší nebo větší než 1. Hodnota K – faktoru výrazně ovlivňuje rozložení a velikost teploty a napětí v nástroji v důsledku zátěže (viz. Obr. 3.3). Pokud je $K = 0,5$, teplota je soustředěna na řezné hraně a dosahuje teploty 618°C . Největší pnutí při $K = 0,5$ se vyskytuje na hřbetě nástroje, kde se rozloží na větší plochu a dosahuje hodnot 1835 MPa , což je v porovnání s ostrou hranou a $K = 2$ nejnižší hodnota. Při $K = 2$ se napětí posouvá směrem k čelu. Největší napětí působí na nástroj s ostrou řeznou hranou, kde se soustředí přímo na hranu.



Obr. 3.3 Simulace teploty a napětí nástroji v důsledku zátěže [29]

3.1 Úprava řezných hran

Úprava mikrogeometrie břitu se v dnešní době používá nejčastěji z důvodu zvýšení trvanlivosti nástroje. Jedná se například o zakřivenost povrchu břitu vlivem drsnosti po broušení a o defekty vniklé po broušení, které mohou vést ke snížení užitných vlastností a životnosti řezného nástroje. Mikrogeometrie nástroje je do jisté míry ovlivněna použitým řezným materiálem ve smyslu, jak dobře jde tento materiál vybrousit k požadovanému ostří. Problém může nastat na ostří nástroje, kde vznikají ostré hrany po broušení vlivem vytrhávání karbidů pojiva. Proto se většina výrobců snaží tomuto problému zabránit a nasazují různé technologické úpravy břitu. [16]

Dokonalá příprava nástroje před použitím, nebo před samotným procesem povlakování je nepostradatelným prvkem, který nesmí být opomenut. Ostří u nových a renovovaných nástrojů je po výrobě nehomogenní a plné defektů. Geometrie nástroje, způsob broušení, velikost brusného kotouče a jeho zrnitost jsou předmětem mnoha „know-how“ patentů. Úpravy mikrogeometrie břitu se neustále vyvíjejí a rozšiřují o nové technologie. Mezi mechanické způsoby úprav patří (viz. Obr. 3.4). Nicméně se zle setkat i s úpravami tepelnými např. laser (viz. Obr. 3.7).



Obr. 3.4 Způsoby mechanických úprav [22]

3.1.1 Kartáčování

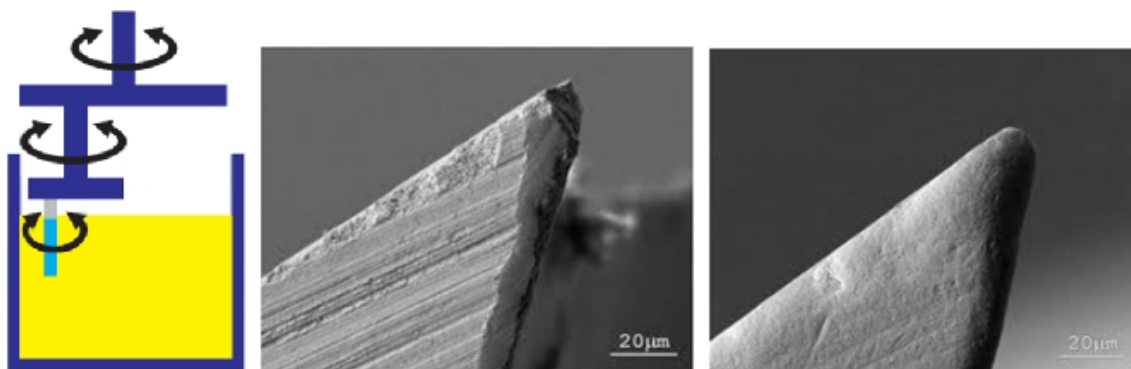
Tato metoda se řadí mezi mechanické metody úpravy řezné hrany. Princip metody je založen na rotaci plastových kartáčových vláken se zabudovaným brusivem přímo ve vláknech. Jako nosné brusivo se používá převážně diamantová pasta. Zvyšováním velikosti zrn brusiva se zhoršuje drsnost povrchu upravovaného nástroje. Drsnost povrchu nástroje také závisí na tvrdosti samotných vláken. Vedle mnoha, jako jsou např. krátká doba úpravy, má tato metoda také velmi podstatnou nevýhodu spočívající v nalepování vláken na samotný nástroj. Nalepený plast se velmi těžko běžnými způsoby odstraňuje, proto není tato metoda vhodná pro následné povlakování, neboť by docházelo k odlupování a špatné adhezi nanesené vrstvy vlivem neočištěného povrchu. [24]



Obr. 3.5 Příklad kartáčování výměnných břitových destiček [25]

3.1.2 Omílání

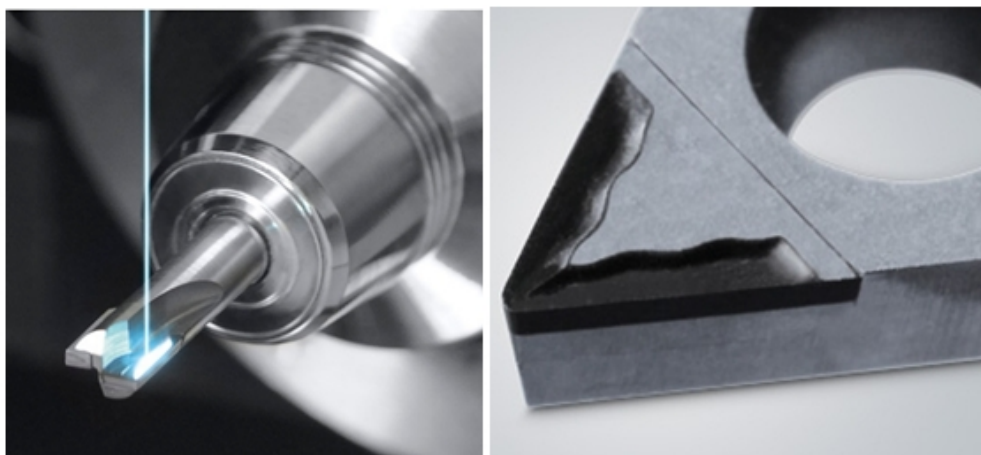
Tato metoda úpravy mikrogeometrie spočívá v upevnění nástroje do speciálního držáku, ponoření do pracovního média a jeho následným pohybem po planetární dráze dochází k pracovnímu procesu. Při tomto procesu dochází vlivem ponoření do média k vysokému tlaku mezi nástrojem a médiem a následný pohyb způsobí abrazivní odebrání materiálu z nástroje. Nastavit lze i směr otáčení, čímž lze zajistit omílání ze strany čela, nebo i ze strany hřbetu nástroje. Lze takto dosáhnout zaoblení až 150 μ m. [26]



Obr. 3.6 Ukázka principu, břitu před a po úpravě omíláním [26]

3.1.3 Úprava laserem

V současné době existuje na světovém trhu několik společností, které integrují laserové zdroje do plnohodnotných strojních zařízení i s víceosou kinematikou. Tato metoda je velice nákladná především proto, že je to nová metoda prováděná hlavně v zahraničí a pořizovací náklady strojů jsou vysoké. K těm nejznámějším patří impulsní lasery DMG MORI LASERTEC 40 PrecisionTool nebo firmy EWAG LASER LINE ULTRA.



Obr.3.7 Ukázka úpravy laserem a soustružnický nůž po úpravě [27]

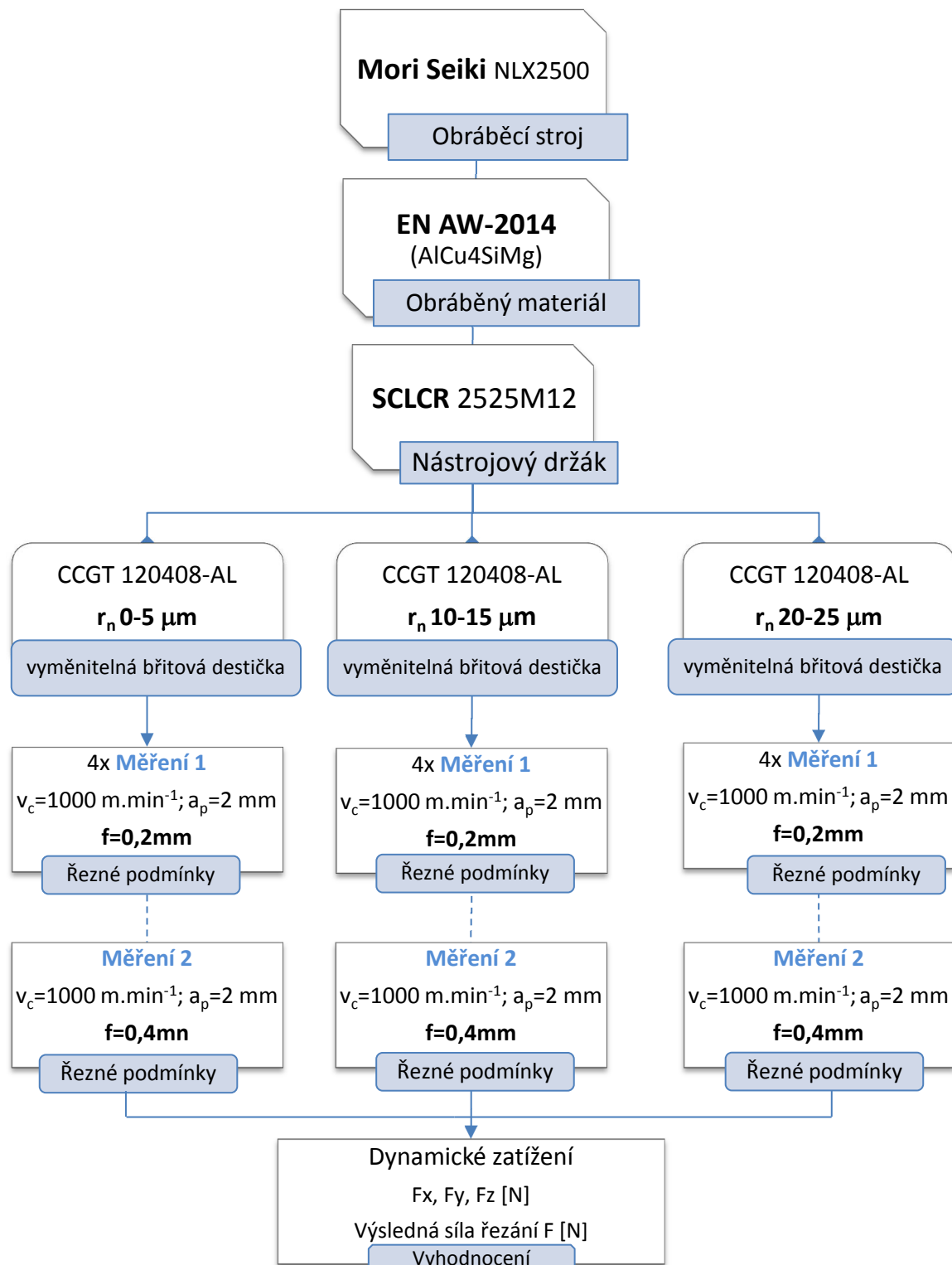
Výkon laseru je volen tak, že jeho absorpcí v povrchové vrstvě a odpařením částic nežádoucí látky nemůže dojít k tepelnému ovlivnění struktury základního materiálu, přičemž lze ovládat hloubka odpařované vrstvy. Mezi výhody patří bezkontaktní obrábění kdy mezi laserovým paprskem a obrobkem nedochází k žádným mechanickým interakcím. Tím je umožněno vytváření řezné hrany rádiusů 2-3 μm bez vylomení ostří. Zpracování široké škály materiálů, zanedbatelné řezné síly a možnost obrábění složitých prvků, kdy průměr laserového paprsku může mít velikost v řádech desítek mikrometrů. [28]



Obr. 3.8 DMG MORI LASERTEC 40 PrecisionTool [27]

4. Stanovení vlivu zaoblení ostří nástroje na dynamické zatížení soustavy

Postup experimentální části práce je znázorněn na schématu, který byl vytvořen k získání základního náhledu použitých prostředků od výchozího stroje.



Obr. 4.1 Schéma experimentální práce

4.1 Volba obráběcího stroje

Pro podélné soustružení polotovaru byl použit CNC soustruh od firmy DMG MORI s označením NLX2500MC/700 (viz. Obr. 4.2). Konstrukce zvoleného CNC soustruhu splňuje veškeré požadavky a nároky spojené s obráběním kovových materiálů se zhoršenou obrobiteľností, přičemž zajišťuje maximální stabilitu rychlosti při obrábění a potřebnou tuhost. Tuhost stroje má přímý vliv nejen na dosahovanou přesnost obrobených ploch, ale hlavně na výkon obrábění.



Obr. 4.2 CNC soustružnické centrum NLX2500MC/700 [30]

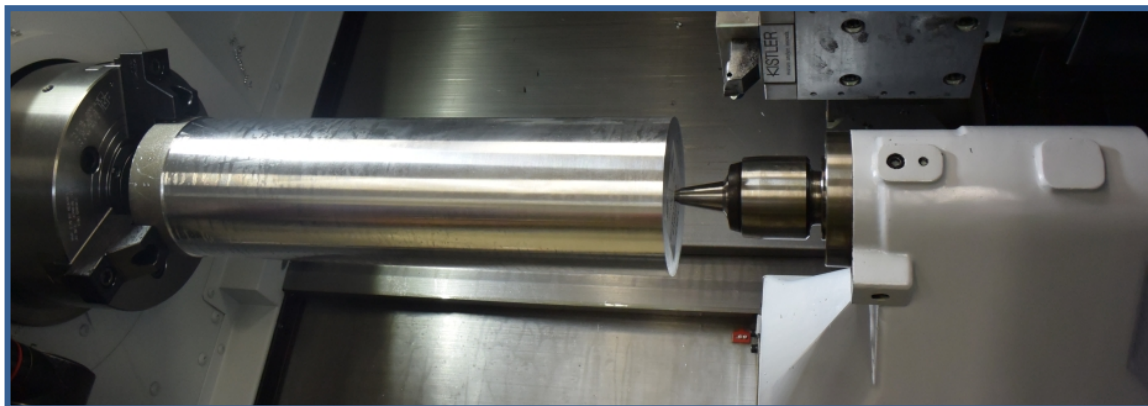
Stroj je vybaven řídicím systémem Mitsubishi M730BM, 12polohovou nástrojovou hlavou se 4mi rotačními nástroji. Soustruh umožňuje obrábět s plynulou změnou otáček, která při obrábění materiálu udržuje konstantní řeznou rychlost.

Tab. 4.1 Parametry CNC soustružnického centra [30]

Pracovní rozsah	Oběžný průměr nad ložem	787 mm
	Největší soustružená délka	705 mm
	Největší průměr obrobku	366 mm
Vřeteno	Rozsah otáček	4000 min ⁻¹
	Výkon vřetene	18,5 kW
Nástroje	Počet nástrojů	12
	Počet poháněných nástrojů	3
Posuvné pohony	Rychloposuv	30 m.min ⁻¹
	NC Koník	

4.2 Hliníková slitina

Jako vhodný obráběný materiál pro experimentální činnost byla zvolena slitina hliníku pod evropským označením EN AW 2014, ČSN 424207 a DIN AlCu4SiMg průměru 130 mm a délky 500 mm.



Obr. 4.3 Upnutý experimentální polotovár pomocí hrotu koníku

Tato hliníková slitina patří díky vyššímu obsahu mědi do skupin vytvrditelných duralů určených k tváření. Tvářené slitiny hliníku nachází v praxi široké uplatnění jako konstrukční materiály ve stavebním, automobilovém, leteckém, ale i počítačovém průmyslu. Al-slitina byla použita ve stavu po tepelném zpracování značeném T6 (rozpouštěcí žíhání, rychlé ochlazení a vytvrzení za tepla), díky které získává podstatně větší mechanické vlastnosti (viz. Tab. 4.2). [36]

Tab. 4.2 Procentuální zastoupení jednotlivých prvků v polotovaru

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	H2
0,62	0,19	4,5	0,70	0,72	0,05	0,01	0,1	0,03	0,01	0,10
Mechanické vlastnosti				Rm [MPa]		HBW[-]		A ₅ [%]		
				465		144		7,0		

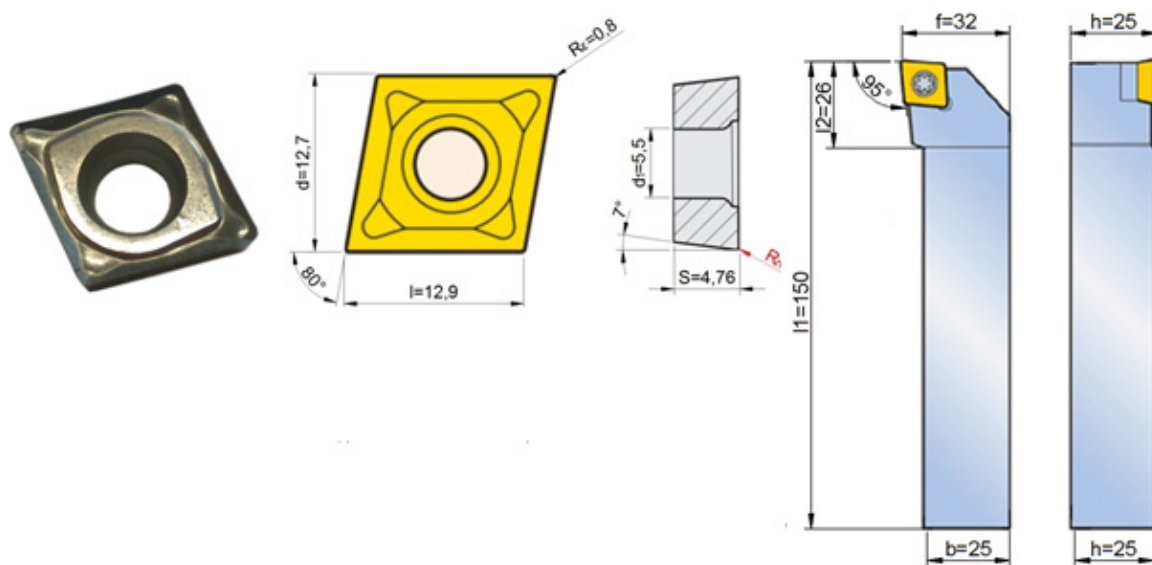
Pro předběžný výpočet řezné síly F_c je důležité znát i měrný řezný odpor této hliníkové slitiny (viz. Tab. 4.3).

Tab. 4.3 Měrné řezná síla hliníkové slitiny [3]

Mat. Skupina	Označení	Tepelné zpracování	$k_{c1.1}$ (N.mm ⁻²)	m_c
N	AlCu4SiMg	T6511	700	0,25

4.3 Volba řezného nástroje

Dle materiálu polotovaru, kterým je slitina hliníku bylo nutno použít VBD s pozitivní geometrií (viz. Obr. 1.3) pro tuto materiálovou třídu určené. Těmi byly tři výměnné břitové destičky CCGT 120408-AL. Destičky byly stejné geometrie typu F (s ostrou hranou), která byla procesem kartáčování upravena na požadované velikosti zaoblení. Rozměrové označení 120408 je popsáno (viz. Obr. 4.4), a tvarové označení CCGT-AL (viz. Tab. 4.4). Pro tyto destičky je posuv ideální v rozmezí 0,15-0,6 mm s hloubkou řezu 0,8-7 mm. (viz. Obr. 1.5). Tato destička byla pomocí šroubu a podložky upnuta do nožového držáku s označením SCLCR 2525M. [37]



Obr. 4.4 Rozměry použitého řezného nástroje [37]

Tab. 4.4 Tvarové označení použitých destiček a držáku. [37]

Tvar destičky	C		Způsob upínání	S	
Úhel hřbetu	C		Tvar destičky	C	
Tolerance	G	 $m \pm 0,025$; $s \pm 0,13$; $d \pm 0,025$	Úhel nastavení	L	
Provedení	T		Úhel hřbetu	C	
Profil hlavního břitu	AL		Směr řezu	R	

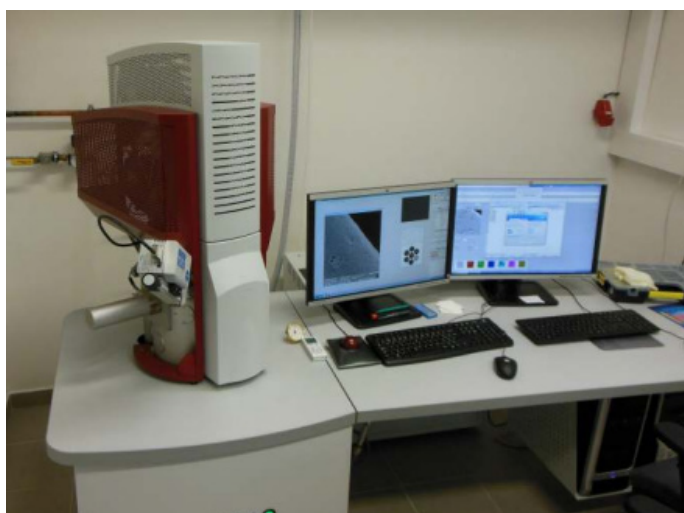
4.3.1 Stanovení velikosti zaoblení ostří nástroje

Z hlediska řezného procesu je velmi důležité umět popsat a změřit řeznou hranu, tak aby řezný proces splňoval základní podmínky záběru. Základní metody, kterými lze měřit zaoblení a drsnost povrchu, lze rozdělit na dotykové (profilometry, laboratorní drsnoměry) a bezdotykové (laserové mikroskopy). Jednotlivé výsledky zaoblení byly spolu s břitovými destičkami dodány ze zkušební laboratoře společnosti Pramet Tools s.r.o, kde byly měřeny na přístroji MAHR MarSurf XC20.



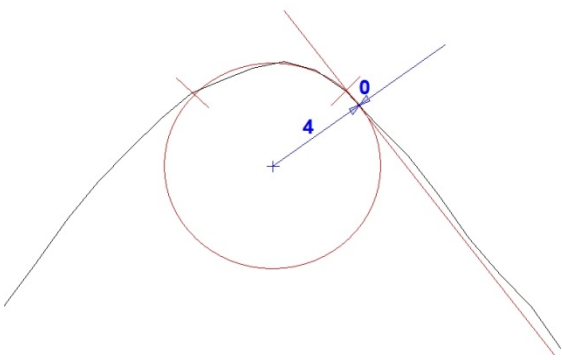
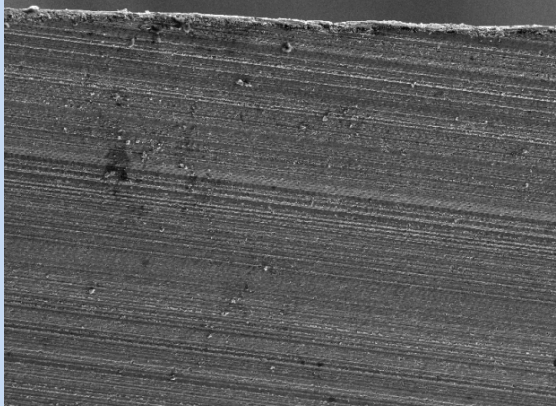
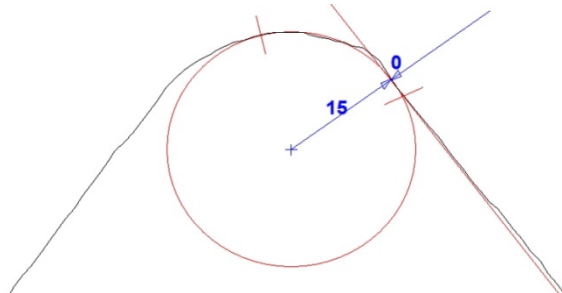

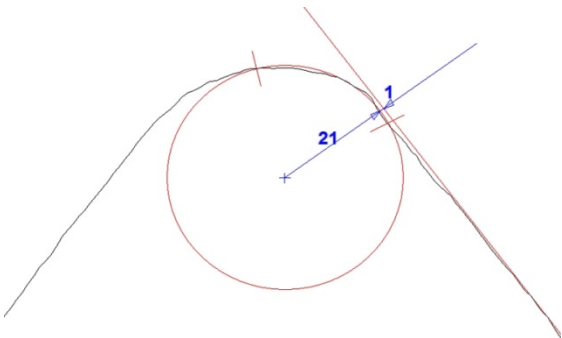
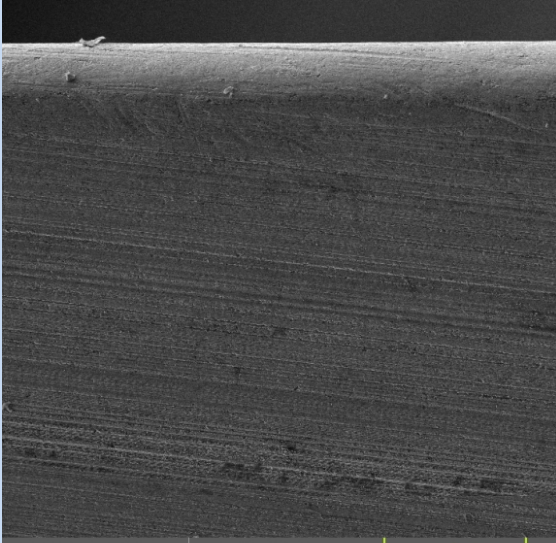
Obr. 4.5 Měřící zařízení MAHR MarSurf XC20 [31]

Dále byly doloženy fotografie z elektronového mikroskopu MIRA3 TESCAN pro grafické porovnání řezných hran (viz. Tab. 4.5), které jsou zaznamenány na délce 250 μm řezné hrany.



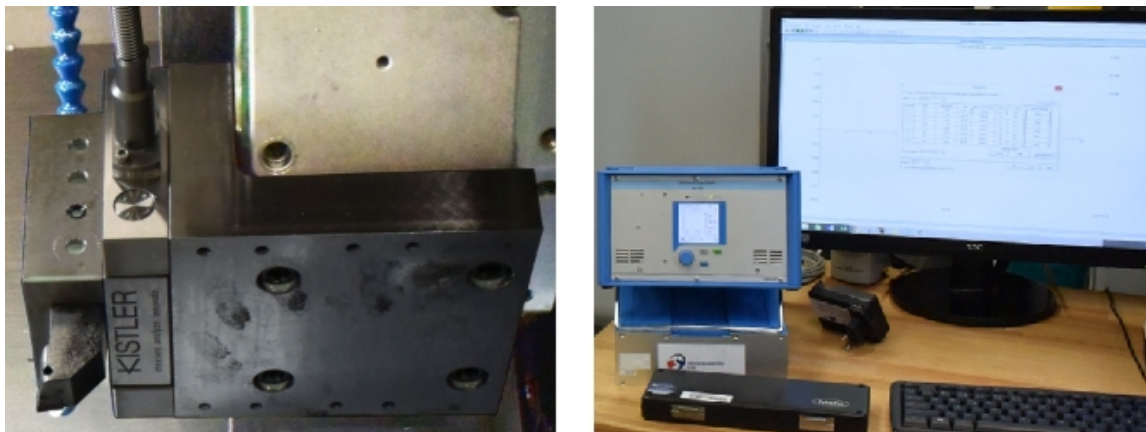
Obr. 4.6 Rastrovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 LMU [32]

Tab. 4.5 Druhy použitých zaoblení

Označení: CCGT 120408-AL	Ostrá hrana r_n 0-5 μm	Průměrné zaoblení 3,6 μm
		
Označení: CCGT 120408-AL	Kartáčování na r_n 10-15 μm	Průměrné zaoblení 13,8 μm
		
Označení: CCGT 120408-AL	Kartáčování na r_n 20-25 μm	Průměrné zaoblení 23,1 μm
		

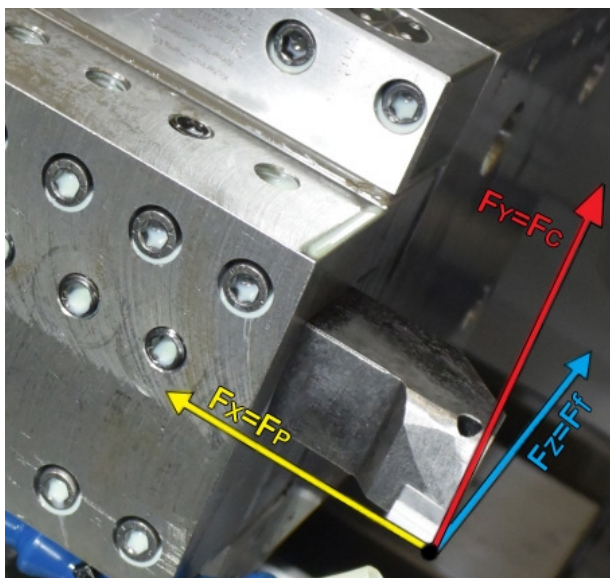
5. Měření jednotlivých složek síly řezání

Tělo soustružnického nože bylo upnuto k ploše třísložkového dynamometru KISTLER, který byl použit pro měření složek sil. Společně byl pomocí přípravku upnut k nástrojové hlavě soustruhu (viz. Obr. 5.1).



Obr. 5.1 Upnutí dynamometru, převodová skříň s pc sestavou

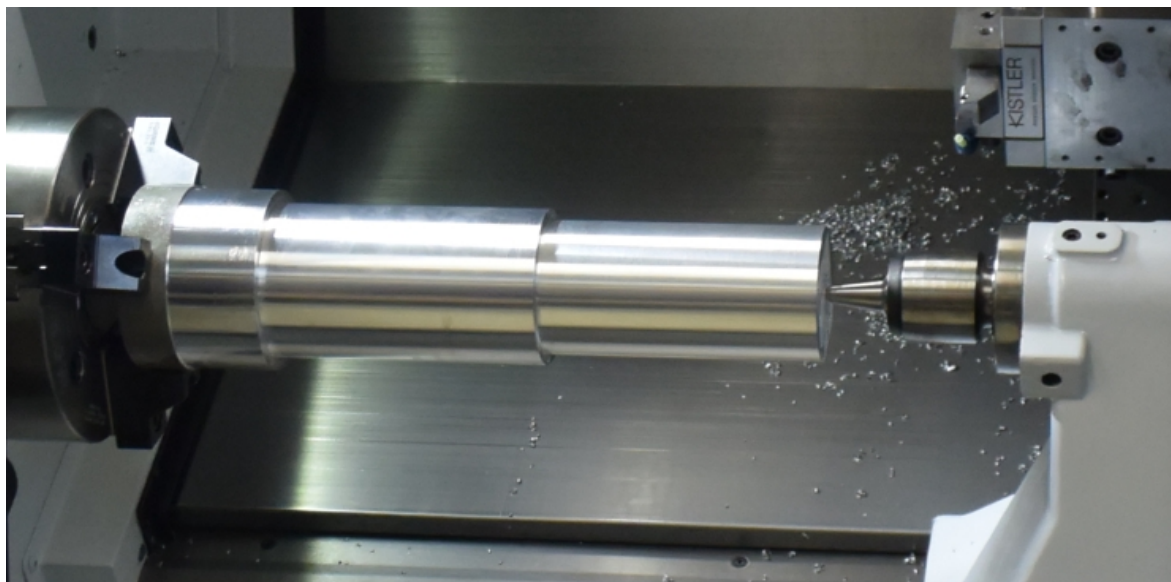
Dynamometr KISTLER 919AA byl na soustruh vzhledem k jeho nastavení směru zaznamenávajících sil a procesu obrábění upnut jako je znázorněno v detailu Obr. 5.2.



Obr. 5.2 Souřadnicový systém procesu na základě upnutého dynamometru

- F_x složka síly řezání působící kolmo od osy obrobku, vyjadřující pasivní (radiální) složku síly řezání F_p ,
- F_y složka síly řezání působící tangenciálně vyjadřující řeznou složku síly řezání F_c ,
- F_z složka síly řezání působící proti směru posuvu, vyjadřující posuvovou složku síly řezání F_r .

Proces experimentu probíhal na základě jednotlivých přejetí válcového polotovaru od čela po délku 250 mm postupně třemi řeznými destičkami stejné geometrie kromě rozdílného poloměru zaoblení. Nejprve byla testována jedna z hran čtyřmi procesy obrábění za použití stejných řezných podmínek kvůli korektnosti údajů a pro zjištění možné závislosti otupení na žerném odporu. Poté byla jednou testovaná nová hrana s dvojnásobnou hodnotou posuvové rychlosti.



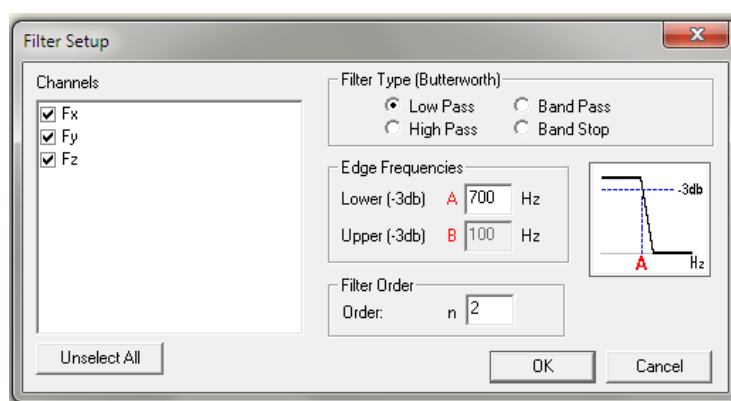
Obr. 5.3 Polotovar při provádění experimentu

Řezné podmínky pro experiment byly stanoveny na základě předběžného výpočtu pro tangenciální sílu F_c (vzorec 2.2) tak aby nepřesahovaly vysokých hodnot. Držák nástroje SCLCR 2525M je konstruován s úhlem nastavení 95° , proto je vzorec upraven (viz. Tab. 5.1). Díky zjištěným údajům byla možnost nastavení maximálního rozsahu pro záznam hodnot na 1000 N. Řezná rychlost byla pomocí doporučených hodnot výrobce a možnosti rezervy od otáčkového maxima stroje nastavena na konstantní hodnotu $v_c = 1000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Při soustružení bylo kvůli typu obráběnému materiálu nutno použít procesní kapalinu.

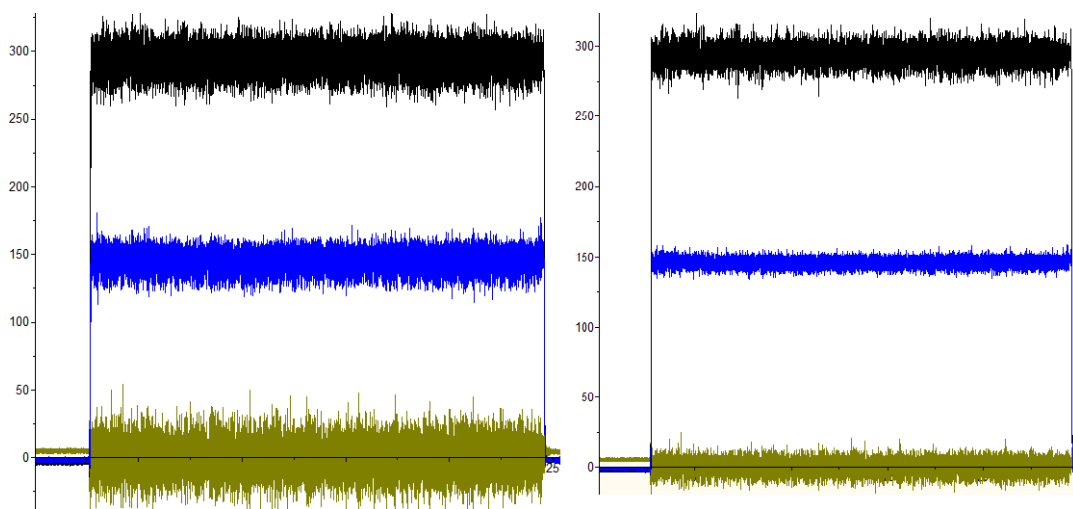
Tab. 5.1 Předběžný výpočet řezné síly F_c

$F_c = k_{c1.1} \cdot \frac{a_p}{\sin \kappa} \cdot (f \cdot \sin \kappa)^{1-mc} [\text{N}]$	
$a_p = 2 \text{ mm}; f = 0,2 \text{ mm}$	$a_p = 2 \text{ mm}; f = 0,4 \text{ mm}$
$F_c = 700 \cdot \frac{2}{\sin 95} \cdot (0,2 \cdot \sin 95)^{1-0,25}$	$F_c = 700 \cdot \frac{2}{\sin 95} \cdot (0,4 \cdot \sin 95)^{1-0,25}$
$F_c = 419,09 [\text{N}]$	$F_c = 704,83 [\text{N}]$

Jednotlivé testy byly zaznamenávány v programu DynoWare, ve kterém se velikosti jednotlivých složek sil barevně znázorňují do grafů. Z programu DynoWare byla možnost data vyexportovat pro další zpracování v programu MS Excel. Hustota hodnot závisí na nastavené vzorkovací frekvenci, která byla nastavena na hodnotu 5000 Hz. Tato frekvence udává počet vzorků za jednotku času načítaných ze spojitého analogového signálu. Nastavení vysoké vzorkovací frekvence udává přesnost analýzy silového zatížení. To poskytuje větší množství naměřených dat. Tyto záznamy obsahují nevypovídající data, která je nutné odstranit pomocí filtrace. V programu DynoWare k tomu slouží možnost filtrování Low Pass, kdy jsou znázorňovány jen frekvence před zadanou hodnotou.



Obr. 5.4 Ukázka nastavení funkce Low Pass



Obr. 5.5 Porovnání grafu před, a po použití filtrace s hodnotou 700 Hz

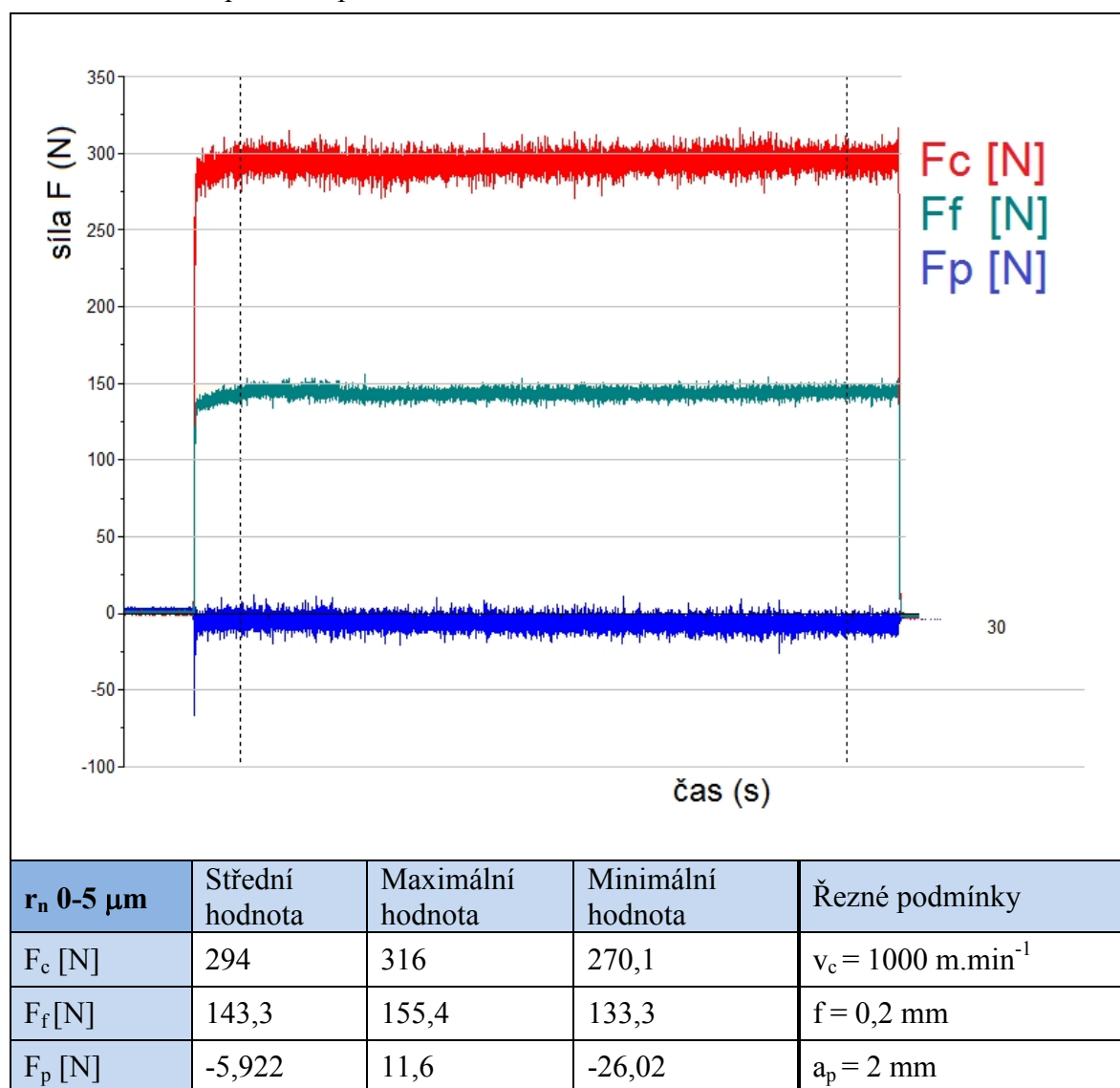
Síla řezání (vznikající při obrábění) je jevem dynamickým. Při obrábění v závislosti na čase její okamžitá velikost F_{ok} kolísá (\pm až 20%), a to i při řezání (obrábění) za konstantních řezných podmínek. Je to způsobeno zejména rozptylem mechanických vlastností obráběného (testovaného) materiálu a mechanikou tvorby třísky. Zejména z tohoto důvodu je pro věrohodnost naměřených výsledků nutné prováděný experiment vždy několikrát opakovat. [13]

6. Stanovení zatížení soustavy SNO

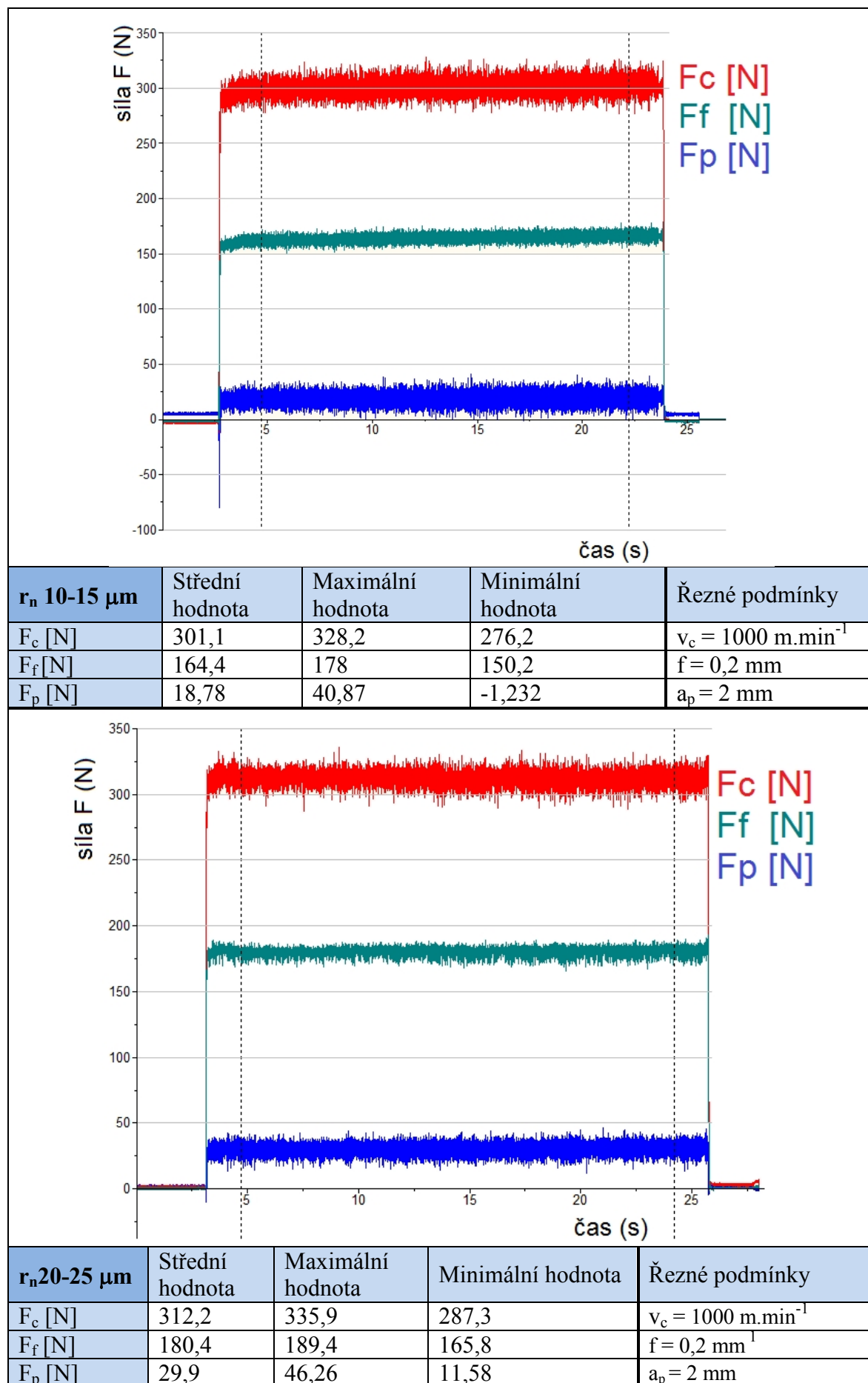
6.1 Stanovení vlivu opotřebení na velikost řezného odporu

Vliv opotřebení na velikosti řezného odporu bylo stanoveno z výsledků naměřených sil čtyřmi po sobě navazujícími obráběními. Měření bylo provedeno pomocí průměrných, minimálních a maximálních hodnot v jednotlivých složkách sil, s třemi druhy zaoblení řezných hran destiček. Tyto hodnoty byly zaznamenány v intervalu, ze kterého je vyloučen vliv náběhu a výběhu z materiálu pomocí funkce MeanVaule .

Tab. 6.1 Náhled průběhu prvního obrobení VBD s ostrou řeznou hranou



Tab. 6.2 Náhledy průběhů obrobení VBD upravených kartáčováním



Tab. 6.3 Srovnání velikostí řezných odporů jednotlivých měření

X_i	Střední hodnota F [N]				Minimální hodnota F [N]				Maximální hodnota F [N]			
	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
F_c	294	303	295	293	270	285	266	263	316	322	321	323
F_f	143	147	148	146	133	136	133	133	155	156	161	157
F_p	-5,9	-3,1	-5,2	-5,5	-26	-15	-18	-18	11,6	8,1	18	24,7
r_n 0-5 μm; $f = 0,2 \text{ mm}$; $a_p = 2 \text{ mm}$; $v_c = 1000 \text{ m.min}^{-1}$												
F_c	301	302	300	300	276	278	273	280	328	327	330	324
F_f	164	166	165	165	150	154	153	155	178	178	177	176
F_p	18,7	18,0	19,8	19,2	-1,2	-5	-6,9	-1,2	40,8	45	44,7	38,7
r_n 10-15 μm; $f = 0,2 \text{ mm}$; $a_p = 2 \text{ mm}$; $v_c = 1000 \text{ m.min}^{-1}$												
F_c	310	-	330	312	303	-	316	287	320	-	344	335
F_f	173	-	188	180	168	-	179	165	178	-	194	189
F_p	33,1	-	27,3	29,9	25,1	-	15,5	11,5	41,1	-	38,1	46,2
r_n 20-25 μm; $f = 0,2 \text{ mm}$; $a_p = 2 \text{ mm}$; $v_c = 1000 \text{ m.min}^{-1}$												

V tabulce byly zaznamenány hodnoty průměrných, maximálních a minimálních řezných sil ze čtyř měření pro 3 druhy VBD vygenerovaných programem DynoWare. Buňky bez hodnot značí případ, kdy nešly hodnoty ze softwaru kvůli namotání třísky na nástroj a obrobek zjistit. Z velikosti řezných odporů v rámci jednoho nástroje lze říct, že se mezi prvním a čtvrtým přejetí nejednalo o zásadní rozdíl, který by mohl být způsoben postupným otupením nástroje.

6.2 Stanovení vlivu zaoblení hrany na velikost řezného odporu

Pro účel tohoto experimentu byla vypočítána výsledná síla řezání F na základě výsledků z jednotlivých měření při prvním použití VBD. Bylo vybráno 10 hodnot pro každou složku síly řezání, které byly získány z těchto měření v místech, ve kterých byl proces ustálený a zaznamenával minimální vychýlení. Tyto hodnoty byly statisticky zpracovány za použití rozšířené nejistoty s koeficientem rozšíření $k_U = 2$ a pravděpodobností pokrytí $p = 95,5\%$.

Výběrový průměr: [33]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.1)$$

Výběrová směrodatná odchylka: [33]

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7.2)$$

Směrodatná odchylka aritmetického průměru (standardní nejistota typu A): [33]

$$u_A = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (7.3)$$

Rozšířená nejistota: [33]

$$U = k_U \cdot u_A \quad (7.4)$$

Výpočet celkové směrodatné odchylky pro celkovou sílu řezání F : [33]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} = (\bar{F} \pm U) [N] \quad (7.5)$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_c = \frac{F_c}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_c}{F} \quad (7.6)$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_p} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_p = \frac{F_p}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_p}{F} \quad (7.7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_f = \frac{F_f}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_f}{F} \quad (7.8)$$

$$S_{(F)} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial F_c} \cdot S_{(F_c)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_f} \cdot S_{(F_f)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_p} \cdot S_{(F_p)}\right)^2} \quad (7.9)$$

Tab. 6.4 Zpracování hodnot pro poloměr zaoblení řezného nástroje r_n 0-5 μm

F_c [N]			F_f [N]		F_p [N]		r_n 0-5 μm
č.	x_i	Σ	x_i	Σ	x_i	Σ	
1.	285,3	2939,9	142,2	1427,6	-6,82	-62,92	$F_c = (293,9 \pm 2,2) \text{ N}$
2.	294,3	\bar{F}	141,9	\bar{F}	-5,05	\bar{F}	$F_f = (142,7 \pm 0,54) \text{ N}$
3.	297,4	293,9	143,6	142,7	-5,42	-6,29	
4.	294,8	$s(F)$	143	$s(F)$	-5,99	$s(F)$	$F_p = (-6,29 \pm 0,45) \text{ N}$
5.	292,5	3,51	141,7	0,86	-6,2	0,71	
6.	292,5	u_A	142,5	u_A	-6,38	u_A	$F = (326,8 \pm 2,01) \text{ N}$
7.	294,2	1,11	142,1	0,27	-6,36	0,22	
8.	295	U	142,8	U	-7	U	
9.	297,4	2,24	144,5	0,54	-7,5	0,45	
10.	296,5		143,3		-6,2		

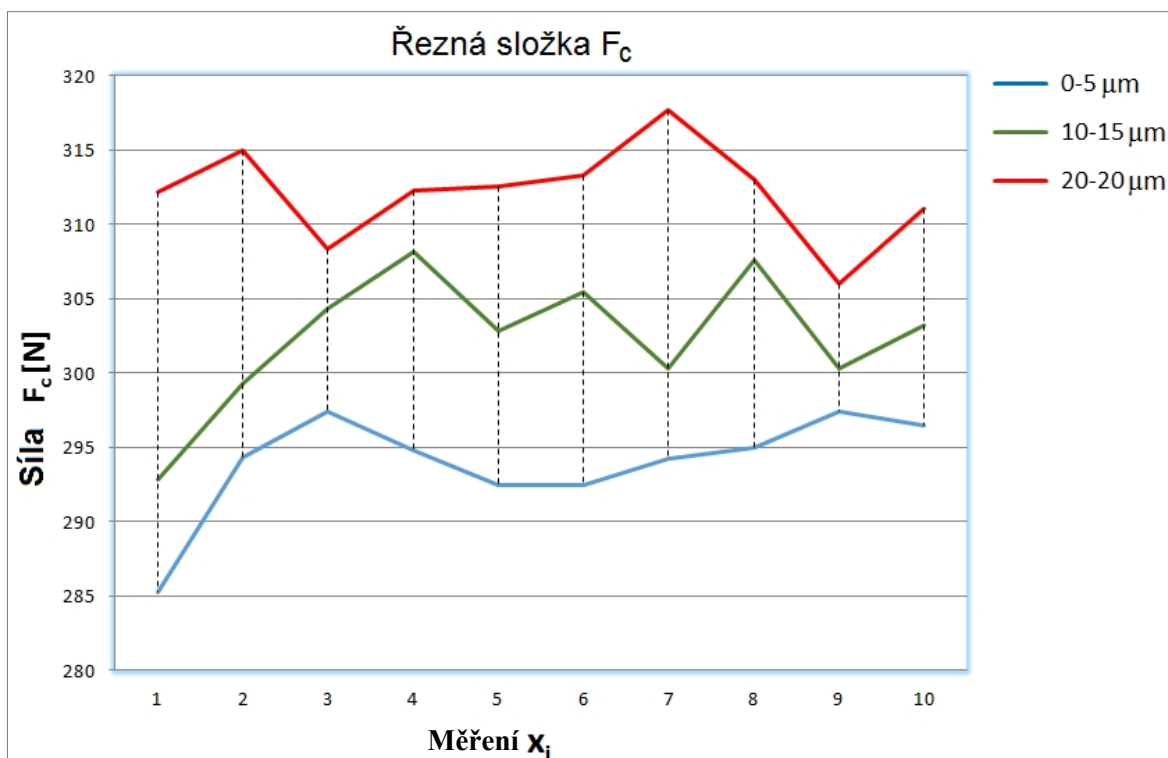
Tab. 6.5 Zpracování hodnot pro poloměr zaoblení řezného nástroje r_n 10-15 μm

F_c [N]			F_f [N]		F_p [N]		r_n 10-15 μm
č.	x_i	Σ	x_i	Σ	x_i	Σ	
1.	292,8	3024,3	161,1	1645,3	17,91	186,86	$F_c = (302,4 \pm 2,8) \text{ N}$
2.	299,3	\bar{F}	158,4	\bar{F}	14,17	\bar{F}	$F_f = (164,5 \pm 1,9) \text{ N}$
3.	304,3	302,43	164,1	164,5	19,07	18,68	
4.	308,2	$s(F)$	164,8	$s(F)$	18,5	$s(F)$	$F_p = (18,6 \pm 1,2) \text{ N}$
5.	302,8	4,53	163,2	3,06	17,52	1,95	
6.	305,5	u_A	167	u_A	19,09	u_A	$F = (344,7 \pm 2,6) \text{ N}$
7.	300,3	1,43	165,8	0,97	19,86	0,61	
8.	307,6	U	169,1	U	21,54	U	
9.	300,3	2,86	166,6	1,94	20,18	1,23	
10.	303,2		165,2		19,02		

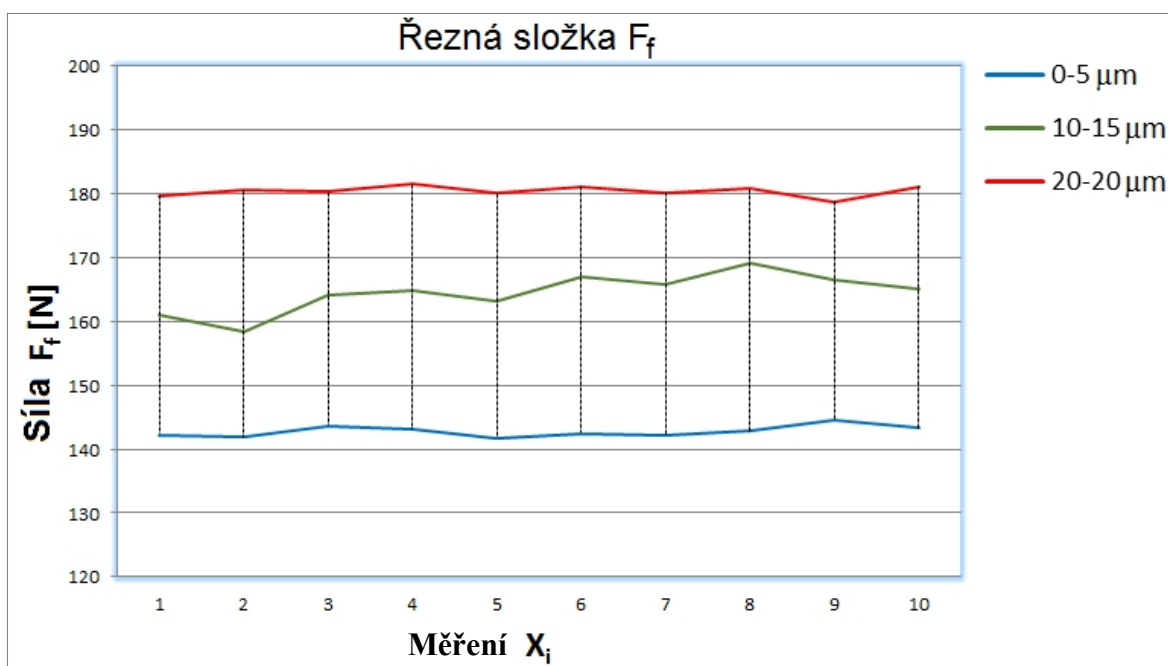
Tab. 6.6 Zpracování hodnot pro poloměr zaoblení řezného nástroje r_n 20-25 μm

F_c [N]			F_f [N]		F_p [N]		r_n 20-25 μm
č.	x_i	Σ	x_i	Σ	x_i	Σ	
1.	312,2	3121,6	179,7	1804,2	28,7	299	$F_c = (312,1 \pm 2,04) \text{ N}$
2.	315	\bar{F}	180,5	\bar{F}	30,37	\bar{F}	$F_f = (180,4 \pm 0,5) \text{ N}$
3.	308,4	312,1	180,3	180,42	30,11	29,9	
4.	312,3	$s(F)$	181,5	$s(F)$	30,25	$s(F)$	$F_p = (29,9 \pm 0,53) \text{ N}$
5.	312,6	3,23	180,1	0,79	30,2	0,85	
6.	313,3	u_A	181,1	u_A	29,9	u_A	$F = (361,7 \pm 1,7) \text{ N}$
7.	317,7	1,02	180,2	0,25	28,9	0,26	
8.	313	U	180,8	U	31,05	U	
9.	306	2,04	178,8	0,5	28,71	0,53	
10.	311,1		181,2		30,83		

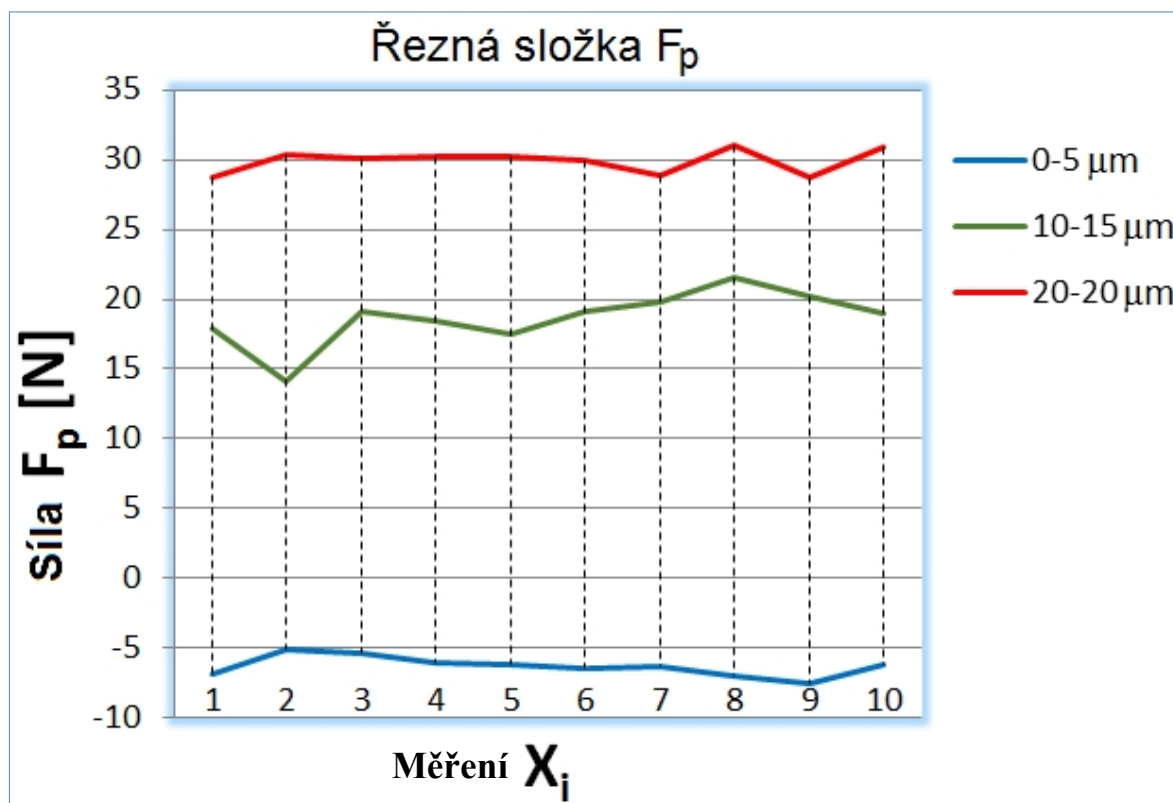
Hodnoty x_i pro výpočet výsledných řezných sil byly dále graficky zpracovány mezi sebou. Ze všech znázorněných grafů je patrné, že se zvětšujícím se úhlem zaoblení řezné hrany se velikost složek výsledné síly řezu při obrábění nezanedbatelně zvětšují. Přesto, že se rozdíly zaoblení pohybují v řádech mikrometrů, výsledné rozdíly měření zatížení se pohybují až do velikosti 40 N, která pro představu odpovídá 4kg tíhové síly.



Graf. 6.1 Porovnání řezných složek F_c



Graf. 6.2 Porovnání řezných složek F_f



Graf. 6.3 Porovnání řezných složek F_p

Z grafu, ve kterém jsou uvedeny porovnání pasivních složek sil F_p je vidět přechod ze záporných hodnot pomocí ostré řezné hrany do kladných. To bylo pravděpodobně způsobeno úhlem nastavení ostří, které bylo při experimentálním obrábění 95° a opačný směr působení sil se začíná projevovat až při větším odporu pomocí většího zaoblení řezné hrany. Ostrou geometrií destičky s velkým úhlem čela a fazetky.

Tab. 6.7 Porovnání celkových řezných sil F

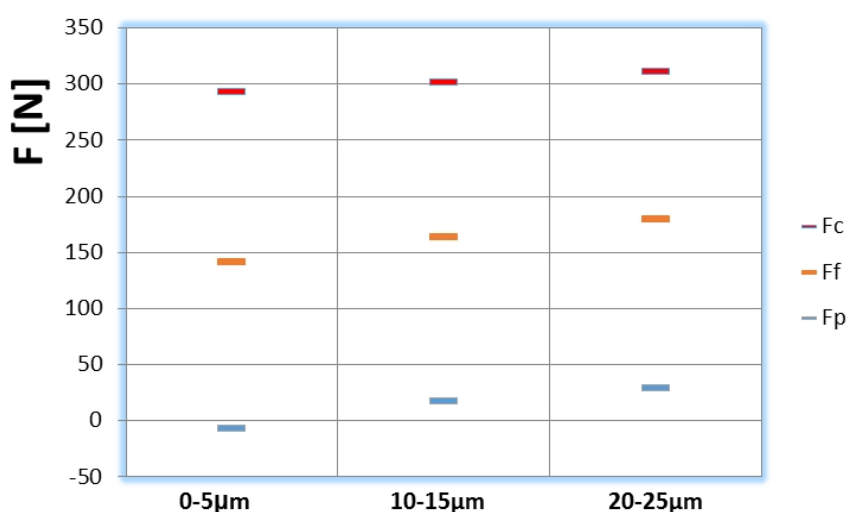
r_n 0-5 μm , $f = 0.2 \text{ mm}$; $a_p = 2 \text{ mm}$; $v_c = 1000 \text{ m.min}^{-1}$	$F = (326,8 \pm 2,01) \text{ N}$
r_n 10-15 μm , $f = 0.2 \text{ mm}$; $a_p = 2 \text{ mm}$; $v_c = 1000 \text{ m.min}^{-1}$	$F = (344,7 \pm 2,6) \text{ N}$
r_n 20-25 μm , $f = 0.2 \text{ mm}$; $a_p = 2 \text{ mm}$; $v_c = 1000 \text{ m.min}^{-1}$	$F = (361,7 \pm 1,7) \text{ N}$

Poměr velikostí použitých řezných destiček s nejmenším a středním poloměrem zaoblení byl stejný jako destiček se středním a největším poloměrem. Tato situace je podobná i u výsledných řezných sil, kdy rozdíl střední velikosti od největší je stejný jako rozdíl nejmenší od střední. Tato hodnota činí 17 N. Teoreticky lze tedy říct, že při použití daných řezných parametrů se při zvětšení poloměru zaoblení r_n o 1 μm celková řezná síla zvětší o 1,74N.

Tab. 6.8 Poměry jednotlivých složek řezných sil

	r_n 0-5 μm	r_n 10-15 μm	r_n 20-25 μm
	$F_c = (293,9 \pm 2,2) \text{ N}$	$F_c = (302,4 \pm 2,8) \text{ N}$	$F_c = (312,1 \pm 2,04) \text{ N}$
	$F_f = (142,7 \pm 0,54) \text{ N}$	$F_f = (164,5 \pm 1,9) \text{ N}$	$F_f = (180,4 \pm 0,5) \text{ N}$
	$F_p = (-6,29 \pm 0,45) \text{ N}$	$F_p = (18,6 \pm 1,2) \text{ N}$	$F_p = (29,9 \pm 0,53) \text{ N}$
Poměr:	1:0,48:0,02	1:0,54:0,06	1:0,57:0,09

Vzájemný poměr mezi silami při podélném soustružení je pro úhel nastavení $\kappa_r = 45^\circ$ z literatury $F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,25$. V provedeném experimentu $\kappa_r = 95^\circ$ lze poměr určit (viz. Tab. 6.8).



Obr. 6.1 Znáznorněná velikost jednotlivých složek při změně zaoblení ostří

Z grafického znázornění (viz. Obr. 6.1) je vidět, že největší vliv zaoblení ostří řezného nástroje je při procesu podélného soustružení na pasivní složku řezné síly F_p a posuvovou složku F_f , jejichž změna je od nejmenšího zaoblení řezné hrany po největší oproti složce F_c dvojnásobná.

Vydělením vypočtených složek sil F_c jmenovitým průřezem třísky A_D lze získat měrnou řeznou sílu k_c , která byla potřebná pro úběr materiálu (viz. Vzorec 2.1.6, 2.1.7). [10]

$$A_D = (f_{ot} \cdot \sin \chi) \cdot \left(\frac{a_p}{\sin \chi} \right) [\text{mm}^2] \quad (6.1)$$

$$A_D = (0,2 \cdot \sin 95) \cdot \left(\frac{2}{\sin 95} \right)$$

$$A_D = 0,4 \text{ mm}^2$$

Tab. 6.9 Výpočet měrných řezných sil

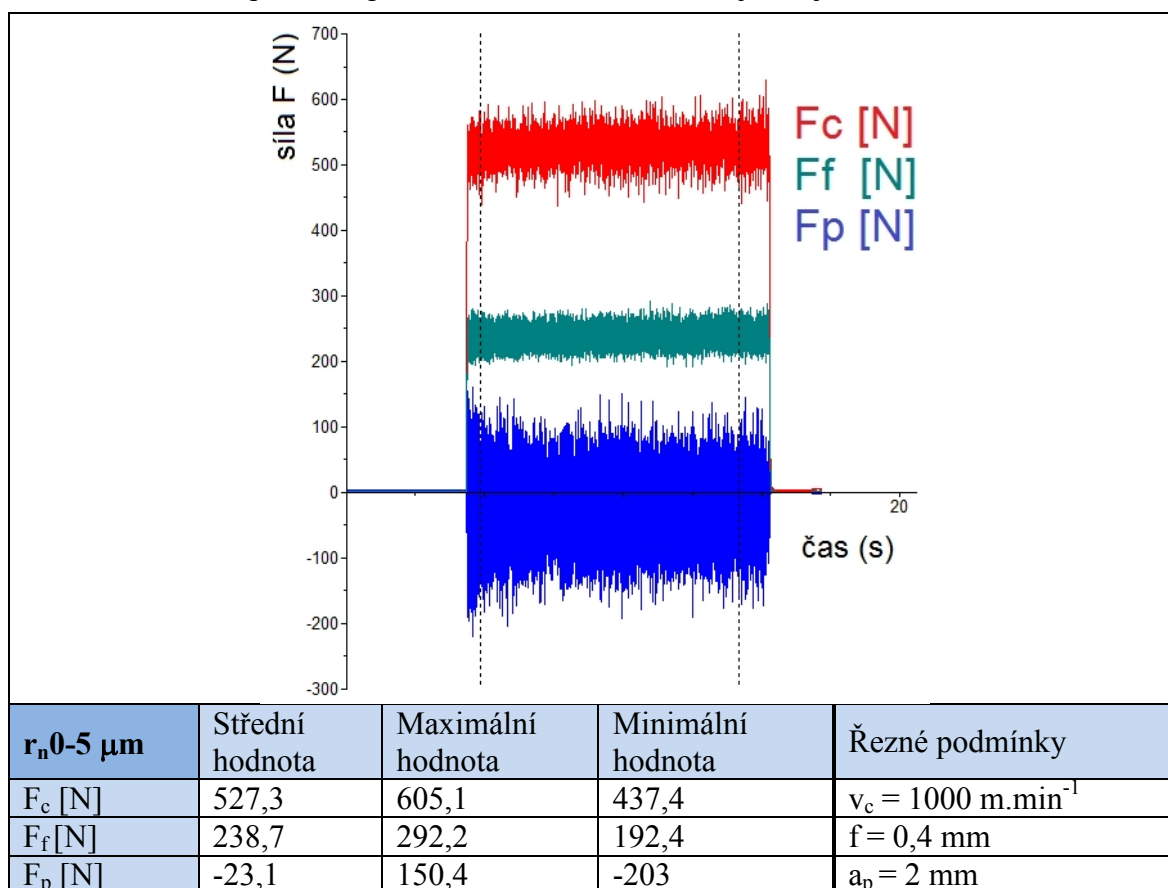
Poloměr zaoblení	Řezná složka F_c	Jmenovitý průřez třísky	Měrná řezná síla
r_n 0-5 μm	$F_c = (293,9 \pm 2,2) \text{ N}$	$A_D = 0,4 \text{ mm}^2$	$k_c = \mathbf{734,9} \text{ N.mm}^{-2}$
r_n 10-15 μm	$F_c = (302,4 \pm 2,8) \text{ N}$	$A_D = 0,4 \text{ mm}^2$	$k_c = \mathbf{756} \text{ N.mm}^{-2}$
r_n 20-25 μm	$F_c = (312,1 \pm 2,04) \text{ N}$	$A_D = 0,4 \text{ mm}^2$	$k_c = \mathbf{780,4} \text{ N.mm}^{-2}$

Je vidět, že vypočtené odpory stejně jako celkové řezné síly F se zvětšujícím se zaoblením řezné hrany rovnoměrně stoupají a přibližně odpovídají hodnotě měrné řezné síle $k_{c1.1}$, která odpovídá pro hliníkové slitiny AW 2014 hodnotě 700 (viz. Tab. 4.3).

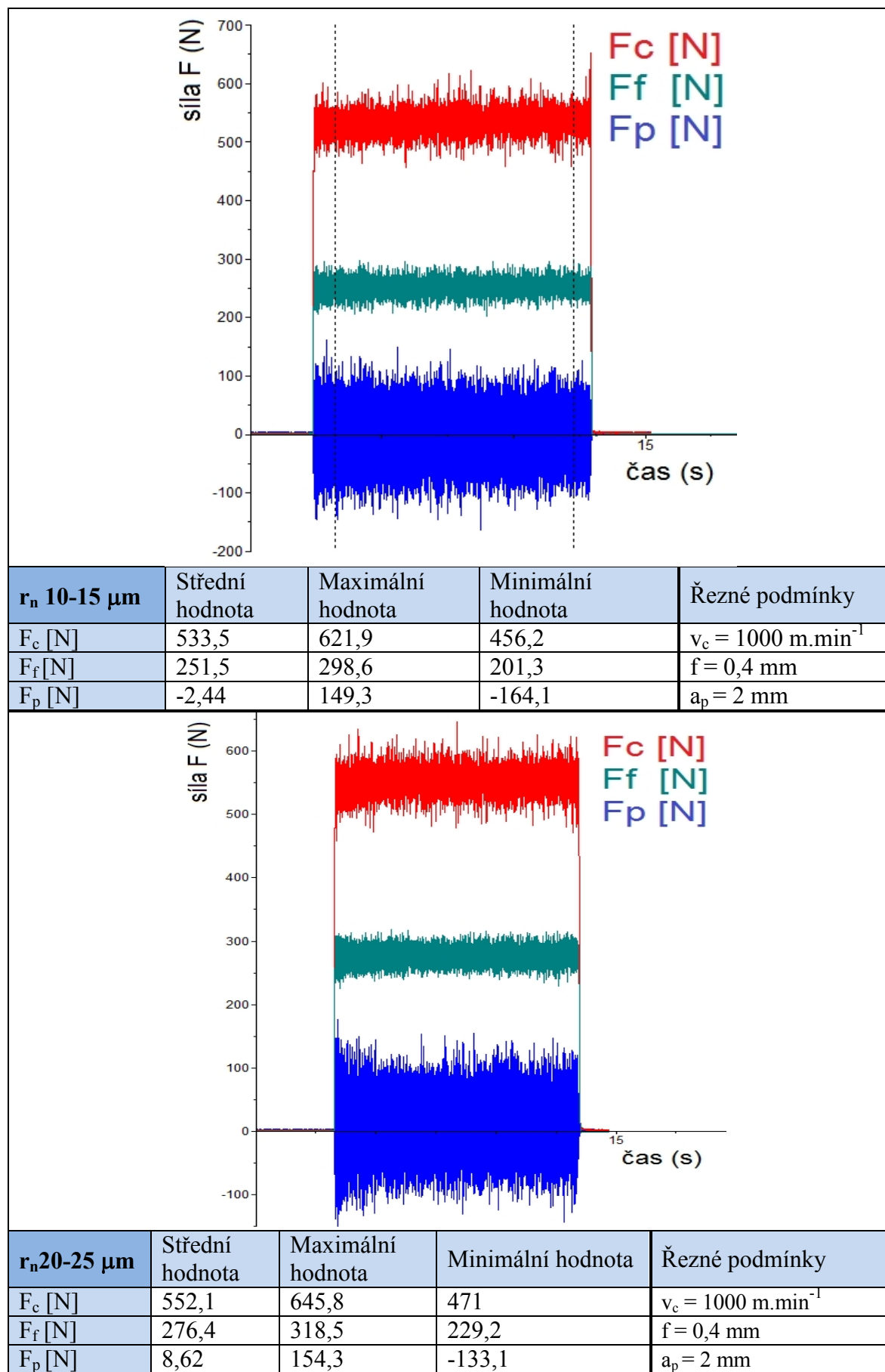
6.3 Stanovení vlivu posuvu na velikost řezného odporu

Dalším krokem experimentální části bylo zhodnocení vlivu posuvu na řezný odpor pro různé velikosti zaoblení řezné hrany. Pro zhodnocení tohoto vlivu byly ponechány řezné podmínky konstantní kromě rychlosti posuvu, která byla zdvojnásobena na 0.4 mm. V případě zvýšení posuvu na dvojnásobnou hodnotu lze kromě zvýšení všech složek sil a přechodu pasivní složky F_p ze záporných do kladných zaznamenat i podstatně větších rozkmitů způsobených vibracemi. Ty jsou v grafech znatelné i po použití filtrování hodnotou 700Hz.

Tab. 6.10 Náhled průběhu prvního obrobení VBD s nejostřejší řeznou hranou



Tab. 6.11 Náhledy průběhů obrobení VBD upravených kartáčováním



Tab. 6.12 Zpracování výpočtů pro poloměr zaoblení řezného nástroje r_n 0-5 μm

	F _c [N]			F _f [N]			F _p [N]		r _n 0-5 μm
č.	x _i	Σ		x _i	Σ		x _i	Σ	
1.	524,9	5303		246,3	2386		-24,1	-250,8	F _c = (530,3±4,47) N
2.	524,3	F̄		239,9	F̄		-29,6	F̄	F _f = (238,6±2,16) N
3.	524,6	530,3		234,2	238,6		-24,3	-25,08	
4.	537,6	s(F)		237,4	s(F)		-26	s(F)	F _p = (-25,1±2,29) N
5.	533,07	7,07		240,5	3,42		-21,4	3,63	
6.	541,8	u _A		238	u _A		-30,2	u _A	F = (582,1±4,17) N
7.	528,1	2,23		235	1,08		-22,8	1,14	
8.	537,1	U		239,6	U		-25,8	U	
9.	532	4,47		236,3	2,16		-28	2,29	
10.	520			239,4			-18,6		

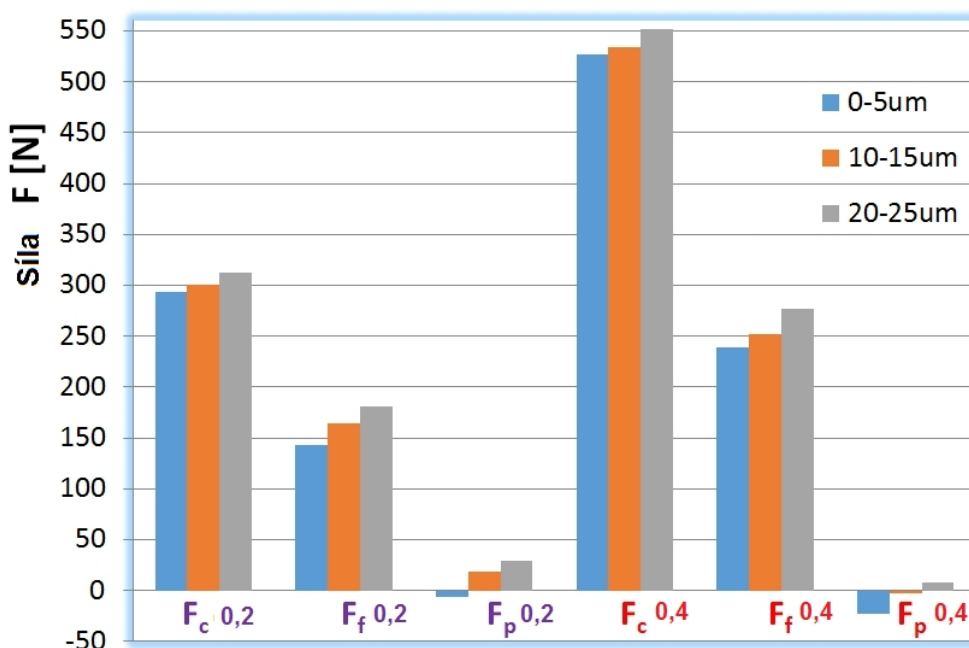
Tab. 6.13 Zpracování výpočtů pro poloměr zaoblení řezného nástroje r_n 10-15 μm

	F _c [N]		F _f [N]		F _p [N]		r _n 10-15 μm
č.	x _i	Σ	x _i	Σ	x _i	Σ	
1.	532,5	5358,4	251,7	2525,9	-3,76	-27,3	F _c = (535,84±3,16) N
2.	534,4	F̄	252,2	F̄	-3,84	F̄	F _f = (252,59±1,17) N
3.	542,9	535,84	250,6	252,59	-5,29	-2,73	
4.	542,2	s(F)	253,8	s(F)	-4,6	s(F)	F _p = (-2,73±1,65) N
5.	529,7	4,99	251,9	1,85	0,2	2,63	
6.	538,4	u _A	251,6	u _A	-3,52	u _A	F = (592,3±2,9) N
7.	534,4	1,58	253,9	0,58	-1,09	0,83	
8.	541,5	U	249,9	U	-6,59	U	
9.	531,2	3,16	254,4	1,17	-0,21	1,65	
10.	531,2		255,9		1,38		

Tab. 6.14 Zpracování výpočtů pro poloměr zaoblení řezného nástroje r_n 20-25 μm

	F _c [N]		F _f [N]		F _p [N]		r _n 20-25 μm
č.	x _i	Σ	x _i	Σ	x _i	Σ	
1.	536,2	5496,6	274,9	2763,7	12,98	95,91	F _c = (549,66±6,52) N
2.	536,5	F̄	273,4	F̄	5,17	F̄	F _f = (276,3±1,16) N
3.	559,5	549,66	275,7	276,3	4,7	9,59	
4.	542,2	s(F)	277,7	s(F)	13,32	s(F)	F _p = (9,59±2,67) N
5.	556,4	10,32	279,4	1,84	11,06	4,22	
6.	549,3	u _A	274,8	u _A	9,23	u _A	F = (615,3±5,85) N
7.	544,4	3,26	277,7	0,58	13,03	1,33	
8.	550,8	U	277,1	U	11,62	U	
9.	568,9	6,52	275,2	1,16	1,73	2,67	
10.	552,4		277,8		13,07		

Ze statisticky zpracovaných výsledků složek řezných sil lze vidět, že dvojnásobná hodnota posuvu má výrazný vliv jak na jednotlivé složky tak výsledné síly řezání pro všechny poloměry zaoblení řezné hrany nástroje (viz. Graf. 6.4).



Graf. 6.4 Znáznornění průměrných hodnot složek sil pro obě rychlosti posuvu a všechny poloměry zaoblení řezné hrany

Z grafu je vidět, že s dvojnásobnou hodnotou posuvu se průměrné hodnoty řezných složek sil F_c a F_f téměř zdvojnásobí pro všechny zaoblení řezné hrany kromě pasivní složky F_p . V pasivní složce se hodnota při zvětšení posuvu dostává ještě do zápornějších hodnot. Lze to odůvodnit úhlem nastavení nástroje, který při tomto posuvu a nejostřejší řezné hraně začíná materiál místo zatlačení kolmo k ose rotace spíše vytahovat. Při střední úpravě řezné hrany na r_n 10-15 μm se pasivní složka síly téměř rovná nule, což se odvíjí i na poměru sil (viz. Tab. 6.15).

Tab. 6.15 Porovnání poměrů $F_c:F_f:F_p$ při použití rozdílné posuvové rychlosti

	r_n 0-5 μm	r_n 10-15 μm	r_n 20-25 μm
Poměr $f = 0.4 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$	1:0,44:0,04	1:0,47:0,005	1:0,5:0,01

Tab. 6.16 Výpočet měrné řezné síly pro posuv 0,2 mm

Poloměr zaoblení	Řezná složka F_c	Jmenovitý průřez třísky	Měrná řezná síla
r_n 0-5 μm	$F_c = (530,3 \pm 4,47) \text{ N}$	$A_D = 0,8 \text{ mm}^2$	$k_c = 662,9 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
r_n 10-15 μm	$F_c = (535,84 \pm 3,16) \text{ N}$	$A_D = 0,8 \text{ mm}^2$	$k_c = 669,8 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
r_n 20-25 μm	$F_c = (549,66 \pm 6,52) \text{ N}$	$A_D = 0,8 \text{ mm}^2$	$k_c = 687,07 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$

7. Zhodnocení

Zhodnocení celé problematiky bylo provedeno na základě porovnání všech naměřených a spočítaných hodnot, včetně tvaru třísek.

Tab. 7.1 Výsledné srovnání poměrů $F_c:F_f:F_p$

	r_n 0-5 μm	r_n 10-15 μm	r_n 20-25 μm
Poměr $f = 0.2 \text{ mm}$	1:0,48:0,02	1:0,54:0,06	1:0,57:0,09
Poměr $f = 0.4 \text{ mm}$	1:0,44:0,04	1:0,47:0,005	1:0,5:0,01

Hodnoty vzájemných poměrů se dle jednotlivých velikostí zaoblení a rychlosti posuvu mění mimo pasivní složky F_p jen nepatrně.

Tab. 7.2 Srovnání měrných řezných sil

	r_n 0-5 μm	r_n 10-15 μm	r_n 20-25 μm
Měrná řezná síla $f = 0.2 \text{ mm}$	$k_c = 734,9 \text{ N.mm}^{-2}$	$k_c = 756 \text{ N.mm}^{-2}$	$k_c = 780,4 \text{ N.mm}^{-2}$
Měrná řezná síla $f = 0.4 \text{ mm}$	$k_c = 662,9 \text{ N.mm}^{-2}$	$k_c = 669,8 \text{ N.mm}^{-2}$	$k_c = 687,07 \text{ N.mm}^{-2}$

Dle vypočítaných hodnot měrných řezných sil lze říct, že se zvětšující se tloušťkou třísky způsobenou zvýšenou hodnotou posuvu měrný řezný odpor klesá.

Tab. 7.3 Srovnání celkových řezných sil

Poloměr zaoblení	Celková síla F pro $f = 0.2 \text{ mm}$	Celková síla F pro $f = 0.4 \text{ mm}$
r_n 0-5 μm	$F = (326,8 \pm 2,01) \text{ N}$	$F = (582,1 \pm 4,17) \text{ N}$
r_n 10-15 μm	$F = (344,7 \pm 2,6) \text{ N}$	$F = (592,3 \pm 2,9) \text{ N}$
r_n 20-25 μm	$F = (361,7 \pm 1,7) \text{ N}$	$F = (615,3 \pm 5,85) \text{ N}$

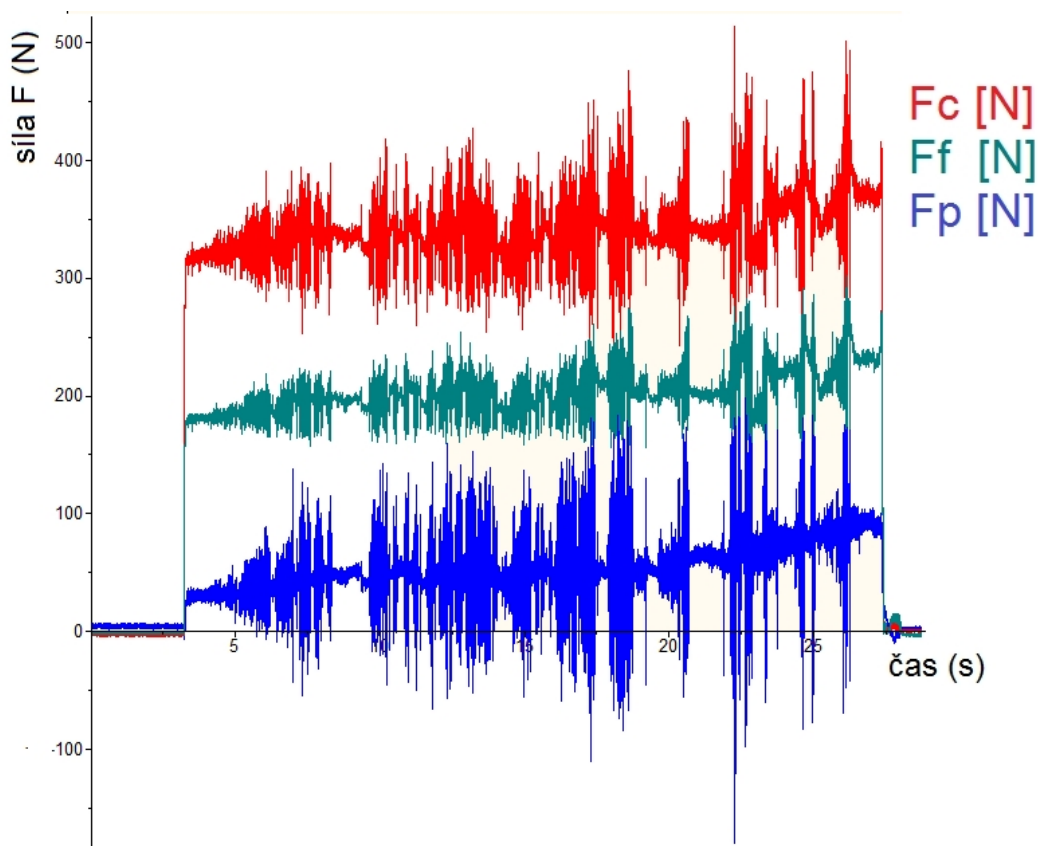
Velikost zaoblení řezné hrany má mnohem menší vliv na výslednou sílu řezání než na velikost jednotlivých složek.

Celkový vliv zaoblení ostří destičky má významný vliv i na tvorbu třísky. Ta byla při mešních zaoblení stočená vinutá kolem malého poloměru, díky čemuž nedocházelo ke komplikacím při namotávání třísky mezi obrobek a nástroj (viz *Obr. 7.1a*). Na rozdíl od největšího poloměru zaoblení řezné hrany, při kterém se tvořila tříska plynulá, a docházelo k namotávání často (viz. *Obr. 7.1b*)



Obr. 7.1 Srovnání tvaru třísek při použití a) nejmenšího poloměru zaoblení, b) největšího

Samotné namotávání třísek provázelo i dynamické procesy, které byly pro vyhodnocování nepoužitelné, proto je bylo nutno opakovat. (viz *Graf. 7.1*)



Graf. 7.1 Zaznamenané dynamické rozkmity při namotání třísky

Závěr

Závěrečné hodnocení experimentu lze v závislosti na velikosti zaoblení řezné hrany nástroje stanovit z několika hledisek. Těmi mohou být požadavky na kvalitu obrobeného povrchu vzhledem k použité geometrii, velikost a druh opotřebení nástroje a případně dynamické vlivy, které řezný proces doprovází. Právě tyto vlivy jsou velice užitečné k pochopení návaznosti určitých parametrů, kterými se tato práce zabývá.

Z prvního měření vyplynulo, že v průběhu jednotlivých přejezdů za použití nástrojů s různou velikostí zaoblení řezné hrany nenastalo vlivem opotřebení nástroje zvyšování řezného odporu. Lze tedy říct, že druh vyměnitelné břitové destičky byl zvolen správně. Naopak často docházelo k jejich snižování vlivem změny geometrie tvořené nárůstky, na které jsou nástroje při obrábění hliníkových slitin extrémně náchylné.

Měření samotného vlivu velikosti zaoblení ostří nástroje na dynamické zatížení soustavy, kterému předcházelo statistické zpracování lze rozdělit do několika částí. Na velikosti, směru jednotlivých složek sil a jejich vzájemný poměr, na vypočítání hodnot celkových řezných sil, měrných řezných sil a jejich porovnání v závislosti na měnícím se poloměru zaoblení ostří nástroje. V poslední části všechny tyto poznatky porovnat se zvýšeným parametrem rychlosti posuvu.

Co se velikosti jednotlivých složek týče, největší rozdíly při použití různých velikostí zaoblení řezné hrany nastávaly v pasivní a posuvové složce síly pohybující se v rozdílech 40N, což byl téměř dvojnásobek změn tangenciální řezné složky F_c . Směry těchto sil byly kromě pasivní F_p konstantní. Tato složka se měla tendenci přesouvat se záporných hodnot se zvětšováním poloměru zaoblení do hodnot kladných. Tento proces byl způsoben kombinací úhlu nastavení nástroje $\kappa_r = 95^\circ$, ostré břitové destičky s velkým úhlem čela a fazetkou. Tyto parametry mají tendenci vytahovat u hliníkových slitin třísku a působit tak opačnou silou. Tato situace se zvětšila se zvýšením posuvové rychlosti až do hodnot -30N pasivní složky kolmé od osy rotace. Poměry velikostí složek $F_c : F_f : F_p$ se při změně geometrie kromě pasivní složky razantně neměnily a pohybovaly se kolem hodnot 1:0,5:0,04. Výsledná síla řezání spočítaná na základě průběhů jednotlivých složek stoupala se stejným poměrem zaoblení o stejnou hodnotu, která činila 17N o přídavek 10 μm zaoblení řezné hrany. Na to, jestli jde o lineární závislost, by bylo třeba dalšího měření. Téměř konstantně stoupala i spočítaná měrná řezná síla, která stoupala při nejmenším zaoblení řezné hrany z 682 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ pro posuv 0,4 $\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ až na hodnotu 780 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ pro posuv 0,2 $\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ s největším zaoblením.

Samotné zvýšení posuvové rychlosti na dvojnásobek měl pro všechny složky kromě pasivní podobný výsledek, a to zvětšení průměrně 1,6 - násobek původní hodnoty. U pasivní složky to byl až trojnásobek především u destičky s nejmenším zaoblením řezné hrany. Významný vliv zaoblení platilo i pro tvorbu třísky. Při použití řezné destičky s nejmenším poloměrem zaoblení nedocházelo k žádným problémům týkající se namotávání a odchodu třísky, přičemž u destičky s poloměrem zaoblení největším tyto problémy nastávaly často. Jak už bylo zmíněno, celkové hodnocení je vhodné brát spolu s těmito vlivy ještě na opotřebení nástrojů a kvalitu obrobeného povrchu, které byly zkoumány v jiné práci.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Zlámalovi, Ph.D za jeho cenné rady čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky.

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2016/172 Vliv technologických parametrů na obrobený povrch a SP2016/174 Studium procesu obrábění progresivních materiálů s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

Seznam použité literatury

- [1] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [2] MRKVICA, Miloš. *Obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1993. ISBN 80-7078-213-7.
- [3] KUDELA, Miroslav. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky* [CoroKey - příručka pro volbu nástrojů]. 1. české vyd. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [4] BRYCHTA, Josef. *Progresivní metody v obrábění: studijní opora*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2513-7.
- [5] BORO VAN, Petr. Řezné nástroje: Soustružení II. *Technický týdeník* [online]. 2011, , 1 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: http://www.penta-edm.cz/dokumenty/aktuality/technicky_tydenik_2011_11.pdf
- [6] KOUŘIL, Miroslav a Josefina SPÁČILOVÁ. *Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem* [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>
- [7] BAMBULA, Michael. Název: Hodnocení obrobitelnosti slitin hliníku – kriteria hodnocení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 27 stran., 2 přílohy. Vedoucí práce: prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
- [8] DEMBEK, Jiří. Slinuté karbidy a jejich efektivní využití: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 101 s., 8 s. příloh. Vedoucí práce: doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [9] ZLÁMAL, Tomáš. *Příspěvek k obrábění Ni superslitiny a hodnocení řezivosti vybraných řezných materiálů*. Ostrava, 2015. 108 s. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Školitel: doc. Ing. Robert ČEP, Ph.D.
- [10] KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [11] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [CD-ROM]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2016-03-15]. ISBN 978-80-248-1505-3.

[12] VRAŠTIL, Marián. *Silové poměry při tvrdém soustružení: [autoreferát] disertační práce*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2692-9

[13] NESLUŠAN, Miroslav. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.

[14] *MM Průmyslové Spektrum: Příručka pro technology*. Praha: MM publishing, s.r.o, 2012, (120314). ISSN 1212-2572.

[15] *Kistler: Measuring Systems and Sensors* [online]. Praha [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/cz/en/>

[16] ČESÁKOVÁ, I., ZETEK, M. DIAGNOSTIKA STAVU ŘEZNÉHO BŘITU PO MIKROÚPRAVÁCH. In *Transfer inovácií*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2011. s. 74-78., ISSN: 1337-7094

[17] *Vliv mikrogeometrie cermetových řezných nástrojů na proces obrábění*. Plzeň, 2014. Bakalářská Práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Ivana Česáková

[18] ASTAKHOV, Viktor P. *Geometry of single-point turning tools and drills: fundamentals and practical applications*. New York: Springer, 2010. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 1849960526.

[19] SAGLAM, Haci, Faruk UNSACAR a Suleyman YALDIZ. Investigation of the effect of rake angle and approaching angle on main cutting force and tool tip temperature. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2006, 46(2), 132-141 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.002. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505001173>

[20] GROTE, Karl-Heinrich. a Erik K. ANTONSSON. *Springer handbook of mechanical engineering*. New York: Springer, c2009. ISBN 3540491317.

[21] DING, Hongtao, Ninggang SHEN a Yung C. SHIN. Experimental Evaluation and Modeling Analysis of Micromilling of Hardened H13 Tool Steels. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2011, 133(4), 041007- [cit. 2016-05-04]. DOI: 10.1115/1.4004499. ISSN 10871357. Dostupné z: <http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=145971>

- [22] CARLOS JULIO CORTÉS RODRÍGUEZ. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing. Kassel: Kassel Univ. Press, 2009. ISBN 9783899587128.
- [23] GROOVER, Mikell P. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. Sixth edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2016. ISBN 9781119128694.
- [24] *Vliv mikrogeometrie cermetových řezných nástrojů na proces obrábění*. Plzeň, 2014. Bakalářská Práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Ivana Česáková.
- [25] FRANZ TIKAL (HRSG.). IN ZUSAMMENARBEIT MIT R. BIENEMANN UND L. HECKMANN. *Schneidkantenpräparation: Ziele, Verfahren und Messmethoden*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2009. ISBN 9783899584943.
- [26] MUŽÍK, Josef. *Návrh přípravků pro úpravu a měření mikrogeometrie břitu*. Plzeň, 2012. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
- [27] LASERTEC Series. *Dmgmori* [online]. [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://en.dmgmori.com/blob/120872/cc1b707f03ee3c2b0bfc81d22c3442ca/pl0uk13-lasertec-series-pdf-data.pdf>
- [28] *Možnosti úpravy břitu řezného nástroje pomocí LASERU*. Plzeň, 2013. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.
- [29] OTEC The Importance of Cutting Edge Preparation. Ebookbrowse.com [online]. 2006 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://ebookbrowse.com/otec-the-importance-ofcuttingedge-preparation-for-customers-12-06-ppt-d144163136>
- [30] Ace-tech: NLX2500. : *CNC Lathe* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.ace-tech.cz/uploads/docs/Mori%20Seiki%20NLX%202500.pdf>
- [31] MAHR. XC 20 - MAHR METROLOGY. [online]. [cit. 28. 4. 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mahr.com/index.php?NodeID=2736>>.
- [32] SMRŽ, P. *Odolnost slinutého karbidu vůči vzniku a šíření tepelných trhlin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 89 s. Vedoucí Ing. Karel Kouřil, Ph.D.

[33] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.

[34] BUMBÁLEK, Bohumil. *VYSOCE PŘESNÉ METODY OBRÁBĚNÍ A JEJICH FYZIKÁLNÍ PODSTATA* [online]. , 63 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opory04.pdf

[35] DE VOS, Patrick. Mechanická zatížení a řezné geometrie při soustružnických operacích: Zatížení při obrábění. *Https://www.secotools.com* [online]. 2015 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/cs/CZ-Czech-Republic/Aktuality/TECHNICKE-LANKY/Mechanicka-zatieni-a-ezne-geometrie-pi->

[36] SLOUKA, M. Mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 7020 za zvýšených teplot. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 55 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc..

[37] PRAMET: Nové výrobky 2016.1. *Dormerpramet* [online]. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: http://www.dormerpramet.com/downloads/news%20catalogue%202016.1_cz.pdf